

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

Facultad de Ingeniería Civil

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



TESIS

**“DISEÑO DE ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE
ÁRBOLES EN EL RÍO MADRE DE DIOS”**

Presentada por:

Alfredo César Jacay Mogollón

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

Línea de Investigación: Saneamiento e Hidráulica

PIURA – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

Facultad de Ingeniería Civil

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

TESIS

**“DISEÑO DE ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE
ÁRBOLES EN EL RÍO MADRE DE DIOS”**

Línea de Investigación: Saneamiento e Hidráulica

Asesor:

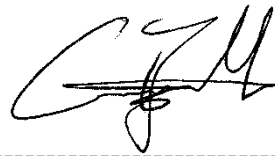
PhD. Luis Miguel Morán Yáñez



Firma

Tesista:

Bach. Alfredo César Jacay Mogollón



Firma


DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS

Yo: **Alfredo César Jacay Mogollón** identificado con DNI N° **70018871**, Bachiller de la Facultad de **Ingeniería Civil** y domiciliado en el **Asentamiento Humano Micaela Bastidas Manzana E3 lote 16** del Distrito de **Piura** Provincia de **Piura**, Departamento de **Piura** Celular **935462106** y Email: **alfredojacaym@gmail.com**.

DECLARO BAJO JURAMENTO: Que la tesis que presento es original e inédita, no siendo copia parcial ni total de una tesis desarrollada, y/o realizada en el Perú o en el Extranjero, en caso contrario de resultar falsa la información que proporciono, me sujeto a los alcances de lo establecido en el Art N° 411 del código penal concordante con el Art. 32° de la Ley N° 27444, y la Ley del procedimiento Administrativo General y las Normas Legales de Protección a los Derechos de Autor.

En fe de lo cual firmo la presente.

Piura 1 de Julio del 2019



DNI N°: 70018871

Artículo 411.- El que, es un procedimiento administrativo, hace una falsa declaración en relación con hechos o circunstancias que le corresponde probar, violando la presunción de veracidad establecida por ley, será reprimido con pena privativa de libertad no menor de uno ni mayor de cuatro años.

Art 4. Inciso 4.12 del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales- RENATI Resolución de Consejo Directivo N°033-2016-SUNEDU/CD

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

Facultad de Ingeniería Civil

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

TESIS

“DISEÑO DE ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ÁRBOLES EN EL RÍO MADRE DE DIOS”

Línea de Investigación: Saneamiento e Hidráulica

Presidente:

Ing. M.Sc. Carmen Chilón Muñoz



Firma

Secretario:

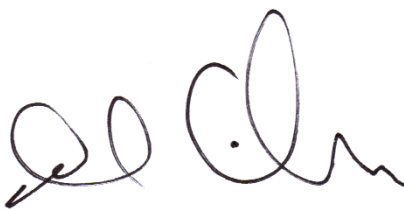
Ing. Luis Alberto Benites Ávalos



Firma

Vocal:

Ing. M.Sc. Carlos Javier Silva Castillo



Firma



UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
Facultad de Ingeniería Civil
DECANATO

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

Los Miembros del Jurado Calificador, que suscriben, reunidos para estudiar el Trabajo de Tesis, presentado por el ex alumno de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Piura.

BACH. JACAY MOGOLLÓN ALFREDO CÉSAR

TESIS TITULADA

"DISEÑO DE ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ÁRBOLES EN EL RÍO MADRE DE DIOS"

Oídas las observaciones y las respuestas a las preguntas, lo declaran

APROBADO... con el calificativo de SOBRESALIENTE...

En consecuencia, queda en condiciones de ser calificado:

APTO.....

Por el Consejo de Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Piura, y recibir el **título de INGENIERO CIVIL**, de conformidad con lo estipulado en el Art. 176 del Estatuto General de la Universidad Nacional de Piura.

PIURA, 23 DE JULIO DE 2019


ING. CARMEN CHILON MUÑOZ Mtro.
Presidente


ING. LUIS ALBERTO BENITES AVALOS
Secretario


ING. CARLOS JAVIER SILVA CASTILLO Mtro.
Vocal

DEDICATORIA

Dios es omnipotente, su espíritu alimenta y cura el alma. Dedico a él este documento porque, en momentos de gozo y tristeza, es fiel amigo y buen consejero. Con Dios todo y sin él nada.

A mi hermano Hyrum, por su actuar altruista. Con tú significativa ayuda esta investigación pudo culminarse. Siempre te estaré agradecido.

A mis padres Martha Juliana y Ricardo. No bastaría esta hoja, para expresar entre líneas, el gran amor que siento por ustedes. Que Dios los llene de bendiciones.

AGRADECIMIENTOS

- ⇒ La fase experimental de esta investigación fue financiada mediante aportes del Contrato N° 358-PNICP-PIAP-2014, firmado entre la Universidad Nacional de Ingeniería y el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad del Ministerio de la Producción, INNOVATE PERU. El autor desea agradecer el apoyo de este programa al proyecto.
- ⇒ Agradezco al Phd. Julio Martin Kuroiwa Zevallos, Director del Laboratorio Nacional de Hidráulica; por aceptar mi participación en el proyecto que él lideraba. Además, agradezco las facilidades que brindó para el uso de las instalaciones y del equipamiento científico del laboratorio.
- ⇒ Agradezco al Phd. Luis Miguel Morán Yañez docente principal de la Universidad Nacional de Piura; por su asesoramiento y confianza brindada. Sin su ayuda, no se hubiera dado la viabilidad para la culminación de esta investigación.
- ⇒ Para el desarrollo de la fase experimental y el procesamiento de datos de esta tesis fue fundamental el trabajo conjunto de todos los que conformamos un grupo de investigación. A todos los que integran este grupo gracias por su compañerismo y ayuda.
- ⇒ Mi agradecimiento al Ing. Luis Castro, Responsable del área de Modelamiento Numérico del Laboratorio Nacional de Hidráulica; por su apoyo desinteresado fomentando el crecimiento profesional del grupo de investigación. Su ayuda intelectual y emocional no serán olvidadas.
- ⇒ Agradezco a mis familiares y amigos cercanos, que formaron y forman parte de mi vida; por sus consejos y ayuda sincera en favor del crecimiento profesional del autor de esta tesis.
- ⇒ Gracias al personal del Laboratorio Nacional de Hidráulica: Al Ing. Miguel Zubiaur, Sr. Hugo Saca, Sr. Gilberto Esquivez, Sr. Fredy Sánchez, Sr. German Quinte, Sr. Segundo Farro, Srta. Irma Alpaca, Pablo Porro e Israel Chuquimajo; quienes me ayudaron en la etapa de la reconstrucción y experimentación del modelo físico.

ÍNDICE GENERAL

	Página
PAGINAS PRELIMINARES	
Hoja de Firma de Ejecutores	ii
Declaración Jurada de Originalidad de Tesis	iii
Hoja de Firmas del Jurado	iv
Acta de Sustentación	v
Dedicatoria	vi
Agradecimientos	vii
INDICES	
Índice General	viii
Índice de Tablas	xii
Índice de Figuras	xv
Índice de Anexos	xix
RESUMEN	xxi
ABSTRACT	xxii
INTRODUCCION	1-2
CAPITULO I: ASPECTOS DE LA PROBLEMÁTICA	3-5
1.1. Descripción de la realidad Problemática	3
1.2. Justificación e Importancia de la Investigación	3
1.3. Objetivos de la investigación	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Delimitación de la investigación	4
1.5. Hipótesis	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	6-37
2.1. Ingeniería de Atascos de Troncos	6
2.1.1. Los escombros de madera y su importancia en los sistemas fluviales	6
2.1.1.1 Consideraciones Biológicas y Ecológicas	6
2.1.1.2. Influencia Geomorfológica	7
2.1.2. Proceso de formación de un Atasco de Troncos	7
2.1.3. Concepto de Ingeniería de Atascos de Troncos	8
2.2. Espigones	10
2.2.1. Definición de espigón	10
2.2.2. Objetivos y Funciones de los Espigones	10
2.2.3. Tipos de Espigones	11
2.3. Criterios de Diseño de Espigones	14
2.3.1. Permeabilidad	14
2.3.2. Extensión de trabajo	16

2.3.3. Trazo en Planta	18
2.3.4. Longitud de los espigones	19
2.3.5. Orientación de los espigones	21
2.3.6. Separación entre los espigones	23
2.4. Análisis de Estabilidad Estructural de un Espigón de Madera	27
2.4.1. Balance de Fuerzas Verticales (Flotabilidad)	28
2.4.2. Balance de Fuerzas Horizontales (Deslizamiento)	31
2.4.3. Balance de Fuerzas que Generan Rotación	36
2.4.4. Balance de Fuerzas que Generan Vuelco	37
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO	38-108
3.1. Descripción de la Metodología de la Investigación	38
3.1.1. Enfoque	38
3.1.2. Diseño	38
3.1.3. Nivel	38
3.1.4. Sujetos	38
3.1.5. Tipo	39
3.2. Procedimiento de Diseño de los Espigones	39
3.2.1. Estudio de la problemática del Río con imágenes satelitales	40
3.2.1.1. Descripción general del alcance del proyecto	40
3.2.1.2. Metodología empleada para Estudiar el Meandro	41
3.2.1.3. Estudio de la migración del Río Madre de Dios	44
3.2.1.4. Resultados	45
3.2.1.5. Conclusiones	45
3.2.2. Estudios fundamentales para conocer las características del Río	47
3.2.2.1. Estudios de Batimetría y Topografía	47
3.2.2.2. Estudio Hidrológico	49
3.2.2.3. Estudios de Suelo	51
3.2.2.4. Estudio del Río en un modelo numérico	54
3.2.3. Concepción del Diseño de los Espigones	55
3.2.3.1. Elección del tipo de madera	55
3.2.3.2. Geometría del espigón	56
3.2.3.3. Disposición del entramado	57
3.2.4. Elaboración del esquema de diseño	58
3.2.4.1. Extensión de trabajo de los espigones	58
3.2.4.2. Longitud, Orientación y Espaciamiento	59
3.2.5. Análisis de estabilidad de la estructura	61
3.2.5.1. Descripción de la geometría y las condiciones hidráulicas	61
3.2.5.2 Cálculo de la flotabilidad	64
3.2.5.3 Balance de fuerzas horizontales - resistencia al deslizamiento	68
3.3. Descripción del Modelo Físico	72

3.3.1. Ubicación del modelo Físico	72
3.3.2. Descripción del prototipo	72
3.3.3. Análisis Dimensional y Proporción de escalas	74
3.3.4. Diseño del Modelo Físico	75
3.3.4.1. Material del lecho del modelo físico	76
3.3.4.2. Caudales Ensayados	79
3.3.5. Estructuras del modelo físico	80
3.3.5.1. Ingreso del modelo	80
3.3.5.2. Canal Experimental	80
3.3.5.3. Final del modelo	81
3.3.5.4. Estructuras Auxiliares	82
3.3.6. Descripción de los Equipos	84
3.3.6.1. Equipo de Medición de velocidades de flujo.	84
3.3.6.2. Equipo de Medición del Lecho del Modelo físico.	86
3.3.6.3. Equipos de replanteo topográfico y de colocación de espigones	88
3.3.6.4. Equipos de medición de caudal y tirantes	88
3.3.6.5. Patrones de flujo.	88
3.4. Procedimiento Experimental	89
3.4.1. Trabajos de Acondicionamiento del Modelo Físico	89
3.4.1.1. Acondicionamiento del Lecho	89
3.4.1.2. Construcción de los espigones a escala 1/60	92
3.4.1.3. Colocación de los espigones en el lecho experimental.	94
3.4.2. Ejecución de Pruebas y Recolección de datos	97
3.4.2.1. Inicio de Ensayo	99
3.4.2.2. Calibración del modelo	100
3.4.2.3. Mediciones	100
3.4.2.4. Finalización del ensayo	104
3.4.2.5 Escaneos del Lecho (Medición de cambios morfológicos)	104
3.4.3 Trabajos de Procesamiento de Datos	105
3.4.3.1 Datos de batimetría	105
3.4.3.2 Datos de velocidad	107
3.4.3.3 Registro de niveles de agua	108
3.4.4 Conversión de Datos de Modelo a Prototipo	108
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	109-
	143
4.1. Descripción General	109
4.2. Ensayos sin Estructuras	109
4.2.1. Análisis de datos de Velocidades Sin estructuras	110
4.2.1.1 Ensayo N°2	110
4.2.1.2 Ensayo N°5	112
4.2.2. Análisis de datos de batimetría	113

4.2.3. Análisis de datos de tirantes	115
4.2.4. Discusión de resultados de ensayos sin estructuras	116
4.3. Ensayos Con Estructuras	117
4.3.1. Ensayo N°3	117
4.3.1.1 Características de la alternativa de Diseño N°1	117
4.3.1.2 Análisis de Resultados	119
4.3.1.3 Discusión de la alternativa de Diseño N°1	124
4.3.2. Ensayo N°4	126
4.3.2.1 Características de la alternativa de Diseño N°2	126
4.3.2.2 Análisis de Resultados	127
4.3.2.3 Discusión de la alternativa de Diseño N°2	133
4.3.3. Ensayo N°6	135
4.3.3.1 Características de la alternativa de Diseño N°3	135
4.3.3.2 Análisis de Resultados	136
4.3.3.3 Discusión de la alternativa de Diseño N°3	142
CONCLUSIONES	144
RECOMENDACIONES	146
BIBLIOGRAFIA	148
ANEXOS	150

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1. Comentarios sobre la orientación de los Espigones (USDA, 1995).	22
Tabla 2.2. Recomendación de separación en curvas.	25
Tabla 2.3. Recomendación de separación en tramos rectos.	25
Tabla 2.4. Recomendaciones de Espaciamiento tomadas del HR Report, SR229.	26
Tabla 2.5. Fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan en una estructura de madera.	27
Tabla 2.6. Coeficientes De Seguridad.	27
Tabla 2.7. Coeficiente de Arrastre relacionados con la tasa de obstrucción y número de Froude.	32
Tabla 3.1. Parámetros de la Cuenca del Río Madre de Dios.	49
Tabla 3.2. Estaciones dentro de la cuenca del Río Madre de Dios.	50
Tabla 3.3. Precipitaciones Máximas de 24 horas para diferentes periodos de retorno de las 8 estaciones identificadas.	50
Tabla 3.4. Caudales máximos de diseño a ser usados en el proyecto de defensas ribereñas.	51
Tabla 3.5. Clasificación de suelo de las muestras obtenidas de la calicata.	53
Tabla 3.6. Ejemplo de cálculo de permeabilidad de un espigón.	58
Tabla 3.7. Coeficientes de seguridad usados en el diseño.	61
Tabla 3.8. Propiedades de la madera utilizada en el diseño.	62
Tabla 3.9. Características hidráulicas y del suelo.	63
Tabla 3.10. Metrado del material de relleno en el talud	63
Tabla 3.11. Metrado de troncos y raíces.	64
Tabla 3.12. Calculo de fuerzas pasivas en cada tronco anclado al talud.	70
Tabla 3.13. Coordenadas de puntos geométricos de calibración.	73
Tabla 3.14. Cotas del Punto C1 en prototipo.	73
Tabla 3.15. Variables utilizadas en el análisis dimensional.	74
Tabla 3.16. Relaciones asociadas entre el modelo y el prototipo para diferentes magnitudes.	75
Tabla 3.17. Valores numéricos de escalas del modelo.	76
Tabla 3.18. Granulometría a escala del material del lecho, río Madre de Dios - Zona La Pastora	78

Tabla 3.19.	Caudales del modelo.	80
Tabla 3.20.	Características de las bombas usadas para el modelo físico.	82
Tabla 3.21.	Especificaciones técnicas del Vectrino Profiler traducidas del manual Nortek.	85
Tabla 3.22.	Especificaciones Escáner laser modelo Focus3D X 330.	86
Tabla 3.23.	Especificaciones técnicas de los equipos topográficos.	87
Tabla 3.24.	Cota y posición con respecto al eje de puntos negativos de la sección 2+340.	89
Tabla 3.25.	Cota de los 5 BM en el modelo físico.	90
Tabla 3.26.	Gama de colores de tarugos empleados en replanteo topográfico.	90
Tabla 3.27.	Dimensiones de la madera empleada para el modelo físico.	92
Tabla 3.28.	Cronograma de ensayos del modelo físico la Pastora.	97
Tabla 3.29.	Caudales en prototipo y modelo utilizados en los ensayos.	98
Tabla 3.30.	Etapas del servicio de escaneo.	105
Tabla 3.31.	Esquema de obtención de Tirantes de agua para una sección típica.	108
Tabla 4.1.	Denominación de las secciones para el ensayo N°2.	110
Tabla 4.2.	Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el ensayo N°2.	111
Tabla 4.3.	Valores numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el ensayo N°5	113
Tabla 4.4.	Niveles de agua en prototipo (m.s.n.m) alcanzados en el ensayo N°5.	116
Tabla 4.5.	Características geométricas de los 12 espigones del primer esquema de diseño.	118
Tabla 4.6.	Características geométricas del Esquema de diseño para el ensayo N°3.	118
Tabla 4.7.	Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el Ensayo N°3.	120
Tabla 4.8.	Variaciones Porcentuales de Velocidades medias del Ensayo 2 con respecto al Ensayo N°3.	121
Tabla 4.9.	Variación de niveles registrados en la punta de los espigones, extensión de la socavación y velocidad media; para el Ensayo N°3.	122
Tabla 4.10.	Tirantes registrados en los espigones del Ensayo 3.	124

Tabla 4.11.	Características geométricas de los 12 espigones del segundo esquema de diseño.	126
Tabla 4.12.	Características geométricas del Esquema de diseño para el ensayo N°4.	127
Tabla 4.13.	Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el Ensayo N°4.	129
Tabla 4.14.	Variaciones Porcentuales de Velocidades medias del Ensayo N°2 con respecto al Ensayo N°4.	129
Tabla 4.15.	Velocidades medias y variación de niveles registrados en la punta de los espigones, para el Ensayo N°4.	133
Tabla 4.14.	Tirantes registrados en los espigones del Ensayo 4.	133
Tabla 4.17.	Características geométricas de los 12 espigones del tercer esquema de diseño.	135
Tabla 4.18.	Características geométricas del Esquema de diseño para el ensayo N°6.	136
Tabla 4.19.	Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el Ensayo N°6.	138
Tabla 4.20.	Variaciones Porcentuales de Velocidades medias del Ensayo 5 con respecto al Ensayo N°6.	138
Tabla 4.21.	Velocidades medias y variación de niveles registrados en la punta de los espigones, para el Ensayo N°6.	140
Tabla 4.22.	Tirantes registrados en los espigones del Ensayo 6.	142

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Ingreso de Madera a un río a partir de un flujo de escombros.	6
Figura 2.2. Árbol depositado en la orilla por acción de las fuerzas de arrastre del Río Amazonas (Iquitos).	7
Figura 2.3. Procedimiento de Entierro de una Pieza Clave.	8
Figura 2.4. Vista en planta de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.	9
Figura 2.5. Espigones de Bolsacreto.	10
Figura 2.6. Corte de un Espigón Permeable Hecho de Pilotes.	11
Figura 2.7. Forma en Planta de los Espigones.	13
Figura 2.8. Gráfico de Relación entre Profundidad de socavación y permeabilidad.	14
Figura 2.9. Gráfico de Relación entre Ángulo del Espigón y V' .	15
Figura 2.10. Gráfico de Relación entre Ángulo de Expansión y Permeabilidad del Espigón.	16
Figura 2.11. Extensión de protección requerida en un canal curvo USACE (1981).	17
Figura 2.12. Trazo del eje del río y líneas extremas de defensa en una rectificación.	17
Figura 2.13. Río con un solo radio de curvatura.	18
Figura 2.14. Curva con distintos radios de curvatura.	19
Figura 2.15. Gráfico de Relación entre Profundidad de socavación adimensional y ancho restringido.	20
Figura 2.16. Gráfico de Relación LBP/PL y Longitud del Espigón en Porcentaje del Ancho del Río.	20
Figura 2.17. Definición del ángulo de orientación (β) de un Espigón.	21
Figura 2.18. Definición del ángulo de Expansión de Flujo.	23
Figura 2.19. Relación entre Longitud del Espigón como Porcentaje del Ancho del Canal y el Ángulo de Expansión de Flujo.	24
Figura 2.20. Esquema de Diseño de espigones.	24
Figura 2.21. Ángulo de Fricción Interna para materiales no cohesivos.	31
Figura 2.22. Coeficiente de Profundidad.	33
Figura 2.23. Coeficiente de Bloqueo.	34
Figura 2.24. Esquema de definición para fuerzas Geotécnicas sobre un Madero Enterrado.	35
Figura 3.1. Ubicación de la Zona de estudio La pastora.	40
Figura 3.2. Características Morfológicas de un Meandro.	41

Figura 3.3.	Diagrama que representa los radios de curvatura, magnitud de desplazamiento y dirección de migración del centroide de la curva durante los Periodos A y B.	44
Figura 3.4.	Círculos inscritos a la Curva de cada Meandro (desde el 27 al 34) para los diferentes Años (1985,2000 y 2015).	46
Figura 3.5.	Área de trabajo del levantamiento topográfico y Batimétrico.	47
Figura 3.6.	Topografía y Batimetría unidas.	48
Figura 3.7.	Sección crítica de la Pastora ubicada en la progresiva 2+500.	52
Figura 3.8.	Ubicación de calicatas.	52
Figura 3.9.	Resultados de la simulación Numérica.	54
Figura 3.10.	Propuesta de diseño de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.	56
Figura 3.11.	Vista en planta de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.	57
Figura 3.12.	Vista en dirección del flujo, de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.	57
Figura 3.13.	Extensión de trabajo teórico de los espigones.	58
Figura 3.14.	Extensión de trabajo de los espigones.	59
Figura 3.15.	Detalle del espaciamiento entre espigones de la alternativa de ensayo N°1.	60
Figura 3.16.	Esquema de diseño alternativa de ensayo N°1.	60
Figura 3.17.	Geometría del Espigón en Dirección del flujo.	62
Figura 3.18.	Geometría del Espigón en Dirección perpendicular al flujo.	62
Figura 3.19.	Ubicación del modelo experimental.	72
Figura 3.20.	Límites del prototipo y Localización de puntos para calibración.	73
Figura 3.21.	Solución gráfica generalizada para la obtención de valor “Z”.	77
Figura 3.22.	Solución gráfica para la obtención del factor de escala $1/\lambda x$.	77
Figura 3.23.	Curva granulométrica (Muestra D6) del material del lecho del río Madre de Dios.	79
Figura 3.24.	Curva granulométrica, en dimensiones de modelo, del material para el lecho.	79
Figura 3.25.	Lecho móvil a escala modelo con presencia de arena limosa en fondo y manto arcilloso en la ribera.	79
Figura 3.26.	Vistas de los tanques vertederos, las pozas de disipación y transición ubicadas antes del inicio del canal experimental.	80
Figura 3.27.	Vista desde un dron del canal experimental. En la imagen se aprecia los muros laterales y secciones relevantes del modelo.	81

Figura 3.28.	Vista del final del modelo. Las flechas verdes indican la recirculación del flujo.	81
Figura 3.29.	Tanque elevado permanente para el almacenamiento de agua junto a las tuberías de impulsión con sus respectivas válvulas.	83
Figura 3.30.	Cisterna y Pozas que abastecen de agua al modelo Físico.	83
Figura 3.31.	Vista posterior de los tanques metálicos vertedores conectadas a las cuatro tuberías de alimentación.	84
Figura 3.32.	Imagen referencial del Vectrino Profiler.	85
Figura 3.33.	Soporte Metálico móvil del Vectrino Profiler construido por el LNH.	86
Figura 3.34.	Escáner laser modelo Focus3D X 330.	86
Figura 3.35.	Trabajos de escaneo sobre el modelo físico usando escáner laser modelo Focus3D X 330.	87
Figura 3.36.	Medición de caudales en el vertedero N°1 con Limnómetro	88
Figura 3.37.	Dron (3DRSolo) con cámara Gopro Hero 4	88
Figura 3.38.	Sección 2+340 de la Pastora, usada para el replanteo de la batimetría del Río.	89
Figura 3.39.	Tomando lectura al BM1 para hacer los cálculos de las cotas de las secciones desde 0+1200+960.	90
Figura 3.40.	Ubicando y colocando tarugos de madera sobre el terreno.	91
Figura 3.41.	Replanteo de los 34 puntos de la sección 1+200.	91
Figura 3.42.	Trabajos de regleo del lecho para su acondicionamiento final.	92
Figura 3.43.	Dimensiones geométricas de un espigón general (dimensiones en m) y de los troncos individuales.	93
Figura 3.44.	Material de madera empleada para la construcción de los espigones a escala.	93
Figura 3.45.	Corte y Perforación de la madera usada en los elementos del espigón.	94
Figura 3.46.	Trabajos de armado de los entramados de troncos.	94
Figura 3.47.	Referenciación de los espigones en el esquema de diseño N°2.	95
Figura 3.48.	Trabajos de excavación y demolición del área que ocuparon los espigones.	95
Figura 3.49.	Trabajos de empotramiento de los espigones.	96
Figura 3.50.	Espigones por posicionar verticalmente.	96
Figura 3.51.	Espigones en su posición final sobre el lecho.	97
Figura 3.52.	Curva Nivel de Tirante Descarga para el punto C1.	99
Figura 3.53.	Ubicación del punto C1 el modelo experimental.	100

Figura 3.54.	Esquema de medición de secciones perpendiculares al eje del teórico del río.	101
Figura 3.55.	Esquema de mediciones para los espigones.	101
Figura 3.56.	Sistema de coordenadas del Vectrino Profiler.	102
Figura 3.57.	Localización del volumen de muestra configurado para los ensayos.	102
Figura 3.58.	Manejo del equipo Vectrino Profiler durante ensayos.	103
Figura 3.59.	Mediciones de niveles de agua.	104
Figura 3.60.	Visualización de la batimetría del lecho de Ensayo N°4 utilizando el software ParaView.	105
Figura 3.61.	Comparación cualitativa de Batimetría Sin Ensayar y la del Ensayo N°5.	106
Figura 3.62.	Comparación topográfica (espigón 11) de la Batimetría Sin Ensayar y N°4	106
Figura 3.63.	Perfil de velocidad en un eje de medición en tres direcciones (X,Y y Z).	107
Figura 4.1.	Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo N°2.	111
Figura 4.2.	Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo N°5.	112
Figura 4.3.	Gama de colores que indican profundidades de la Batimetría sin ensayar.	114
Figura 4.4.	Comparación de secciones topográficas de la Batimetría N°5 y Batimetría Sin Ensayar.	115
Figura 4.5.	Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo 3.	119
Figura 4.6.	Comparación cualitativa de la Batimetría N°3 y Batimetría Sin Ensayar.	121
Figura 4.7.	Secciones de Espigones del Esquema de Diseño 1. Comparación de la Batimetría N°3 y Batimetría Sin Ensayar.	123
Figura 4.8.	Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo 4.	128
Figura 4.9.	Comparación cualitativa de la Batimetría N°4 y Batimetría Sin Ensayar.	130
Figura 4.10.	Secciones de Espigones del Esquema de Diseño 2. Comparación de la Batimetría N°4 y Batimetría Sin Ensayar.	132
Figura 4.11.	Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo 6.	137
Figura 4.12.	Comparación cualitativa de la Batimetría N°6 y Batimetría Sin Ensayar.	139
Figura 4.13.	Secciones de Espigones del Esquema de Diseño 3. Comparación de la Batimetría N°6 y Batimetría Sin Ensayar.	141

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Propiedades del suelo y sustrato.	150
Anexo 2. Tasa de aumento del radio de curvatura y migración del centroide de los Meandros 27 a 34 para los años 1985 -2000 y 2000-2015.	150
Anexo 3. Estudio de la Migración lateral. Geometría de los Meandros 27 a 34.	151
Anexo 4. Valores de coeficiente de importancia basado en el riesgo.	151
Anexo 5. Predicción - Migración lateral. Geometría de los Meandros 27 a 34.	152
Anexo 6. Vista en perspectiva 3d de la Propuesta de Diseño 3d	153
Anexo 7. Plano de detalles de la Propuesta de Diseño 2d	154-155
Vista en dirección del Flujo	154
Vista perpendicular al flujo y vista en planta	155
Anexo 8. Primera Configuración de diseño (Esquema de diseño N°1)	156-158
Distribución General	156
Elevaciones, Secciones y Planta Espigones 1- 6	157
Elevaciones, Secciones y Planta Espigones 7-12	158
Anexo 9. Segunda Configuración de diseño (Esquema de diseño N°2)	159-161
Distribución General	159
Elevaciones, Secciones y Planta Espigones 1-5	160
Elevaciones, Secciones y Planta Espigones 6-11	161
Anexo 10. Tercera Configuración de diseño (Esquema de diseño N°3)	162-164
Distribución General	162
Elevaciones, Secciones y Planta Espigones 1-6	163
Elevaciones, Secciones y Planta Espigones 7-12	164
Anexo 11. Secciones Topográficas Normales Ensayo N°3	165-169
Secciones Topográficas 1-2	165
Secciones Topográficas 3-4	166
Secciones Topográficas 5-6	167
Secciones Topográficas 7-8	168
Secciones Topográficas 9-11	169
Anexo 12. Secciones Topográficas Normales Ensayo N°4	170-174
Secciones Topográficas 1-2	170
Secciones Topográficas 3-4	171
Secciones Topográficas 5-6	172

Secciones Topográficas 7-8	173
Secciones Topográficas 9-11	174
Anexo 13. Secciones Topográficas Normales Ensayo N°5	175-179
Secciones Topográficas 1-2	175
Secciones Topográficas 3-4	176
Secciones Topográficas 5-6	177
Secciones Topográficas 7-8	178
Secciones Topográficas 9-11	179
Anexo 14. Secciones Topográficas Normales Ensayo N°6	180-184
Secciones Topográficas 1-2	180
Secciones Topográficas 3-4	181
Secciones Topográficas 5-6	182
Secciones Topográficas 7-8	183
Secciones Topográficas 9-11	184
Anexo 15. Secciones Topográficas con Espigones - Ensayo N°3	185-187
Secciones Topográficas 1-4	185
Secciones Topográficas 5-8	186
Secciones Topográficas 9-12	187
Anexo 16. Secciones Topográficas con Espigones - Ensayo N°4	188-190
Secciones Topográficas 1-4	188
Secciones Topográficas 5-8	189
Secciones Topográficas 9-11	190
Anexo 17. Secciones Topográficas con Espigones - Ensayo N°6	191-193
Secciones Topográficas 1-4	191
Secciones Topográficas 5-8	192
Secciones Topográficas 9-12	193

RESUMEN

El meandro del Río Madre de Dios llamado “La pastora”, de 4km de longitud, sufre del avance lateral acelerado de su banco externo. Esta situación, ha afectado a viviendas de la ciudad de Puerto Maldonado y a la carretera interoceánica sur. Para resolver esta problemática y ante a la ausencia de materiales como roca o concreto en esta región, surge como alternativa de solución de bioingeniería el uso de Espigones Fabricados con Troncos de Árboles. Sin embargo, esta tecnología que ha sido aplicada con éxito en ríos de poco caudal de Norte América, Europa y Oceanía; requiere de su estudio para ser aplicado a este río amazónico. El objetivo de esta tesis fue el diseño de esta clase de espigones para controlar la erosión lateral del caso mencionado. De modo que esta experiencia sirva para futuros proyectos con similares condiciones y problemática. El proceso involucró la creación de un diseño preliminar a partir, del estudio de criterios de diseño y de la adaptación de esta tecnología foránea. Este diseño preliminar fue refinado hasta en 3 oportunidades mediante un modelo hidráulico físico siguiendo estos pasos; el ensayo de la propuesta, el análisis y discusión de resultados y reformulación del diseño. El estudio se realizó en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería (LNH-UNI) usando un modelo físico de lecho móvil y a escala no distorsionada 1/60. En él se simuló al río bajo escenarios de un cauce sin estructuras y con los espigones, bajo un caudal máximo de 514 l/s. Los resultados obtenidos correspondían a datos de velocidades, batimetría y tirantes, con los que se analizó los cambios morfológicos e hidrodinámicos que produce cada esquema de diseño. Del estudio se logró definir que el tercer esquema de diseño fue el que mejor resultados ofreció en términos de protección de la zona afectada y reducción en la socavación de espigones; con lo cual se concluiría la etapa de diseño. A partir de este punto, la metodología y los criterios empleados en el diseño, validados en el modelamiento físico, forman ahora parte del estado del arte del diseño de espigones y pueden ser utilizados, mediante estudio, en proyectos de control de erosión de ríos.

Palabras claves: Espigones Fabricados con Troncos de Árboles, Control de Erosión de un río, Criterios de diseño de espigones, Modelo Hidráulico Físico.

ABSTRACT

The meander of the Madre de Dios River called "La Pastora", 4km long, suffers from the accelerated lateral advance of its external bank. This situation has affected homes in the city of Puerto Maldonado and the Southern Interoceanic highway. To solve this problem and in the absence of materials such as rock or concrete in this region, the use of Engineered Log Jams emerges as a bioengineering solution alternative. However, this technology has been applied successfully in small watercourses in North America, Europe and Oceania; It requires of its study to be applied to this Amazonian River. The objective of this thesis was the design of this type of groynes to control the lateral erosion of the aforementioned case. So that this experience will be useful for future projects with similar conditions and problems. The process involved the creation of a preliminary design based on the study of design criteria and the adaptation of this foreign technology. This preliminary design was refined up to 3 times by a physical hydraulic model following these steps; the test of the design proposal, the analysis and discussion of results and reformulation of the design. The study was carried out in the facilities of the National Hydraulic Laboratory of the National University of Engineering (LNH-UNI) using a 1/60 undistorted, mobile bed, scale model. It simulated the river under scenarios of a channel without structures and with the groynes, under a maximum discharge of 514 l/s. The results obtained corresponded to 3d velocity field, bathymetry and water levels, with this data the morphological and hydrodynamic changes produced by each groyne plan layout were analyzed. From the study it was possible to define that the third groyne plan layout was the one that offered the best results in terms of protection of the affected area and stability of groynes; concluding the design stage. From this point, the methodology and criteria used in the design, validated in physical modeling, are now part of the state of the art groyne design and can be used, through study, in riverbank erosion control projects.

Keywords: Engineered Log Jams, Erosion control on a riverbank, Design criteria of groynes, Physical Hydraulic Model.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la degradación de los bancos de los ríos de la Amazonía Peruana ha aumentado producto de la migración lateral acelerada de sus meandros. Esta situación que se encuentra relacionada con actividades de origen antropogénico como la minería aurífera informal; ha ocasionado problemas en zonas cercanas a áreas pobladas donde mucha infraestructura pública y privada ha sido construida.

Particularmente, en el Sector La Pastora (Puerto Maldonado) se han generado fenómenos de erosión lateral acelerada al pie de los taludes de la margen derecha del Río Madre de Dios. Este fenómeno que ocasiona el colapso de los acantilados, en una longitud de casi 1543 m, afecta a los predios de la ciudad de Puerto Maldonado y pondrá en riesgo la estabilidad del tramo urbano (Km 480+070 – Km 480 +910) de la carretera interoceánica sur.

Para resolver esta problemática una solución ampliamente usada es el uso de espigones contruídos con materiales tradicionales como roca o concreto. Sin embargo, en esta región, estos materiales no son disponibles y por lo tanto deben buscarse métodos alternativos de control de erosión. Uno de estos métodos se encuentra dentro del campo de la bioingeniería y es el uso de Espigones Fabricados con Troncos de Árboles, que en inglés son llamados Engineered Log Jams (ELJ). Esta solución utilizaría como material; la madera proveniente de la abundante vegetación arbórea cercana a los bancos de los ríos. Sin embargo, esta tecnología que ha sido aplicada con éxito en ríos de poco caudal de Norte América, Europa y Oceanía; aún no cuenta con precedentes en el Perú.

Estas estructuras replican la complejidad de los atascos de troncos naturales en ríos por lo que está clasificada dentro del campo del biomimetismo (ciencia o disciplina que estudia a la naturaleza y la utiliza como fuente de inspiración para resolver problemas tecnológicos). Al emular a la naturaleza pueden ser aplicados en proyectos de restauración de ríos o cuando solo se requiere solucionar problemas de erosión en riberas. Sin embargo, este tipo de estructuras requieren de un estudio concienzudo para poder ser aplicables a las condiciones hidrológicas e hidráulicas de nuestros ríos amazónicos.

Por lo tanto, esta investigación tiene por objetivo Diseñar los espigones Fabricados con Troncos de Árboles en el Río Madre de Dios -Ciudad de Puerto Maldonado y explicar su proceso, para que esta experiencia sirva como antecedente para futuros proyectos de control de erosión en ríos de la selva peruana.

Para abordar el diseño de los espigones fabricados con troncos de árboles es importantísimo, comprender la hidrodinámica y morfodinámica del río de forma natural para luego hacerlo con estructuras. El procedimiento de diseño en sí, es un proceso iterativo y de toma de decisiones. Es necesario poner a prueba un primer diseño (primera alternativa), evaluar su desempeño, corregirlo y someterlo nuevamente a prueba; de esta forma se mejora el diseño hasta encontrar el óptimo. En esta tesis se desarrollaron tres alternativas de diseño que pretendían solucionar la problemática de la Pastora.

El río sin estructuras y con las alternativas de diseño, fueron estudiados en un modelo físico a escala 1/60 en un total de 6 ensayos experimentales; 1 ensayo de calibración, 2 sin estructuras y tres con las alternativas. El modelo Físico toma el nombre del mismo tramo del cauce del río Madre de dios que se estudia “La Pastora”, y fue construido dentro de las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Es importante mencionar que, el proyecto al que pertenece esta tesis de investigación es de nombre “Espigones fabricados con Troncos de Árboles: Una Alternativa contra la Erosión en Ríos Meándricos”. Este proyecto fue financiado por INNOVATE PERU e involucró la participación de tesis de postgrado y pregrado de distintas universidades públicas del Perú. Estos tesis fueron capacitados en el curso “Metodología para reforestar ríos degradados por actividades humanas usando técnicas de bioingeniería” dictado por los ingenieros Phd. Pierre Y. Julien y Phd. Douglas Shields. Jr, así mismo se realizaron cooperaciones con investigadores internacionales asociados con el Laboratorio Nacional de Hidráulica. De este modo los resultados de esas investigaciones también complementan a la presentada en este documento.

La estructura de la tesis inicia con una “Introducción” y posteriormente consta de 4 capítulos esenciales que forman el cuerpo de la investigación. En el primer capítulo “Aspectos de la Problemática” se hace una descripción de la misma, se muestra la justificación y la importancia de la investigación, los objetivos, la delimitación e hipótesis que enmarcan al proyecto de tesis. En el segundo capítulo se hace una presentación vasta de las “Consideraciones Teóricas” con las cuales se fundamenta esta investigación. El tercer capítulo detalla la “Metodología” que se empleó para realizar las propuestas de diseño; se explica el proceso de modelamiento físico y describe las diferentes estructuras que conforman al modelo; y se redacta todo el procedimiento de ensayos y procesamiento de datos. En el capítulo 4 se analizó los resultados obtenidos en la etapa experimental y se discute sobre estos. Luego y en base al capítulo 4 se darán las “Conclusiones” y las “Recomendaciones” de la tesis. Finalmente, se muestra la “Bibliografía” utilizada y los “Anexos” donde se encuentran los planos detallados, tablas y figuras.

Al realizar el diseño de los Espigones Fabricados con Troncos de Árboles en el Río Madre de Dios - Zona la Pastora y al verificar su funcionamiento en ensayos experimentales; permitirá crear un antecedente en el Perú. Precisamente, la metodología del diseño foránea adaptada a las condiciones de los ríos de la selva peruana y las conclusiones que resultan del estudio; formarán parte del estado del arte del conocimiento de diseño de espigones. Por lo tanto, podrán ser tomados en cuenta en futuros proyectos cuando se requiera proteger riberas de los ríos de la selva del Perú.

De esta forma se piensa beneficiar a los habitantes de Puerto Maldonado- Zona la Pastora perteneciente al departamento de Madre de Dios. El problema en esta región es una muestra representativa de lo que sucede en la amazonia peruana. Se espera comprobar su correcto funcionamiento en los proyectos de protección ribereña, a fin de beneficiar a los pobladores de regiones de la selva peruana y a partir de este punto a todo el Perú.

I. ASPECTOS DE LA PROBLEMÁTICA

1.1.DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

Durante las últimas décadas, la degradación de los bancos de los ríos de la Amazonía Peruana ha aumentado producto de la migración lateral acelerada de sus meandros. Esta situación que se encuentra relacionada con actividades de origen antropogénico como la minería aurífera informal; ha ocasionado problemas en zonas cercanas a áreas pobladas donde mucha infraestructura pública y privada ha sido construida.

Particularmente, en el Sector La Pastora (Puerto Maldonado) se han generado fenómenos de erosión lateral acelerada al pie de los taludes de la margen derecha del Río Madre de Dios. Este fenómeno que ocasiona el colapso de los acantilados, en una longitud de casi 1543 m, afecta a los predios de la ciudad de Puerto Maldonado y pondrá en riesgo la estabilidad del tramo urbano (Km 480+070 – Km 480 +910) de la carretera interoceánica sur.

Para resolver esta problemática una solución ampliamente usada es el uso de espigones construidos con materiales tradicionales como roca o concreto. Sin embargo, en esta región, estos materiales no son disponibles y por lo tanto deben buscarse métodos alternativos de control de erosión. Uno de estos métodos se encuentra dentro del campo de la bioingeniería y es el uso de Espigones Fabricados con Troncos de Árboles, que en inglés son llamados Engineered Log Jams (ELJ). Esta solución utilizaría como material; la madera proveniente de la abundante vegetación arbórea cercana a los bancos de los ríos. Sin embargo, esta tecnología que ha sido aplicada con éxito en ríos de poco caudal de Norte América, Europa y Oceanía; requiere de su estudio para aplicarlo a ríos amazónicos los cuales poseen características distintas.

El proceso de diseño de los Espigones Fabricados con troncos de Árboles, es un proceso iterativo que requiere el refinamiento de un diseño preliminar hasta lograr alcanzar la meta del proyecto. Para construir precisamente este diseño se usan criterios y recomendaciones de diseño que son el resultado de experiencias en campo y laboratorio realizados por investigadores alrededor del mundo. Algunos trabajos importantes como Maza et al. 1989 y Brown (1985) recopilan información de campo y experimental, dando como resultado recomendaciones y una guía de diseño.

En gran parte, los estudios experimentales de espigones en laboratorios han sido enfocados hacia los espigones tradicionales y bajo condiciones específicas de experimentación, lo cual hace que extrapolar estas experiencias a un nuevo proyecto ELJ sea difícil de realizar. Aunque existen experiencias como la de Shields et al. 2016, protocolos de diseño como los de Abbe and Brooks. 2011, guías de diseño como las de knutson and Fealko. 2014 y Brooks, A. et al, (2006); con respecto a la tecnología ELJ y por citar algunas importantes. Todas las investigaciones estuvieron enfocadas en ríos foráneos con condiciones hidráulicas e hidrológicas diferentes a los ríos de la Amazonía; por lo tanto, existe un amplio campo por estudiar.

1.2.JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

Cuando se empieza a hablar de métodos de control de erosión un método ampliamente aplicado es el uso de espigones fabricados con materiales tradicionales. Estos métodos se vuelven costosos cuando la disponibilidad de materiales para fabricarlos como roca o concreto, no son disponibles en regiones como los de la selva peruana. Por lo tanto, utilizar métodos alternativos como los espigones fabricados con troncos de árboles debería ser una alternativa más sostenible. Así mismo esta técnica tiene un aporte biológico importante para recuperar ecosistemas degradados, y pueden ser utilizados para proyectos de restauración de ríos en la selva peruana.

Ejemplificar el diseño de esta clase de espigones para la problemática de la zona “La Pastora” Río Madre de Dios Pastora y al verificar su funcionamiento en ensayos experimentales; permitirá crear un antecedente en el Perú. Precisamente, la metodología del diseño foránea adaptada a las condiciones de los ríos de la selva peruana y las conclusiones que resultan del estudio; formarán parte del estado del arte del conocimiento de diseño de espigones. Por lo tanto, podrán ser tomados en cuenta en futuros proyectos cuando se requiera restaurar o proteger riberas de los ríos de la selva del Perú.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar los espigones Fabricados con Troncos de Árboles en el Río Madre de Dios -Ciudad de Puerto Maldonado y explicar su proceso, para que esta experiencia sirva como antecedente para futuros proyectos de control de erosión en ríos de la selva peruana.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar la migración lateral del río Madre de Dios usando imágenes satelitales.
- Recopilar información sobre las variables de flujo y parámetros del cauce para entender la hidráulica del río.
- Utilizar los conceptos de Ingeniería de Atascos de Troncos para crear una Arquitectura de Espigones adaptable a las condiciones del río estudiado.
- Evaluar criterios de diseños de espigones y trazar en planta un esquema de diseño.
- Realizar el diseño hidráulico de los espigones Fabricados con troncos de árboles.
- Evaluar experimentalmente las condiciones naturales del río y la alternativa de diseño en un modelo físico a escala 1/60.
- Analizar resultados del modelamiento físico y reformular el diseño.
- Repetir la evaluación y el análisis de resultados para el diseño reformulado hasta en 2 oportunidades.
- Describir las consideraciones de diseño para los espigones fabricados con troncos de árboles, los cuales lograron mejores resultados.

1.4.DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación muestra el proceso de diseño de Espigones Fabricados con Troncos de Árboles como una solución para el problema de erosión lateral en el Río Madre de Dios. El problema en esta región es una muestra representativa de lo que sucede en la Amazonía peruana. Así que las conclusiones del estudio, ampliarán el estado del arte del diseño de espigones en Perú.

Cuando se habla de ampliar el estado del arte, indicamos que el procedimiento de diseño mostrado y las conclusiones del estudio (criterios de diseño validados en modelo físico experimental) pueden ser empleados, en proyectos de control de erosión en bancos de ríos. Esto se realizará claramente mediante su estudio cuando los ingenieros civiles o hidráulicos encargados del diseño recurran a esta información. A partir de este punto los beneficiados serán directamente la comunidad de ingenieros y consecuentemente con la implementación de estas estructuras los pobladores de regiones de la selva peruana y finalmente del Perú.

Esta investigación fue de carácter experimental. Se reprodujo el tramo del cauce llamado la pastora dentro de un ambiente específico de pruebas y se fue modificando diferentes configuraciones de diseño de espigones fabricados con troncos de árboles para observar que sucede con cada uno de estos. La fase de experimentación duraría 8 meses y la de procesamiento de datos 2 meses. Es

necesario mencionar que esta tesis forma parte del proyecto de investigación financiado por INNOVATE PERU llamado “Espigones Fabricados Con Troncos de árboles: Una Alternativa Contra la Erosión en Ríos Meándricos” que involucra la participación de tesis de postgrado y pregrado de diferentes universidades públicas del Perú. Sus investigaciones complementan a la tesis presentada en este documento.

1.5.HIPÓTESIS

Los espigones fabricados con troncos de árboles logran eficientemente alejar la erosión de la margen derecha del río estudiado, retienen sedimentos en la zona de campos de espigones, y dispuestos de forma correcta disminuyen los riesgos de inestabilidad estructural.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. INGENIERÍA DE ATASCOS DE TRONCOS

2.1.1. Los escombros de madera y su importancia en los sistemas fluviales

La madera es un componente de la materia de partículas que transportan los arroyos y ríos a través del mundo. Desempeña un rol importante en los ecosistemas fluviales y sobre la morfología fluvial, desde que aparecieron los árboles hace unos 360 millones de años. Lo cual ha queda evidenciado, cuando se encuentra madera petrificada en depósitos de sedimentos fluviales.

La madera cuando queda atascada en los ríos, los afecta de formas distintas; afecta el almacenamiento de sedimentos, crea extensiones de material aluvial en los lechos de roca, crea piscinas, incrementa la retención de materia orgánica y nutrientes, y forma islas en canales con grandes llanuras de inundación. (Philip Roni et.al, p.3, 2014).



Figura 2.1. Ingreso de Madera a un río a partir de un flujo de escombros.

Fuente: Diario el Comercio 2017.

La principal fuente de donde proviene la madera son las riberas; y su reclutamiento ocurre mediante varios procesos: caída de árboles por mortalidad, erosión de bancos y flujos de escombros (ver Figura 2.1). Así mismo, el reclutamiento de madera, varía como una función de la distancia de separación entre la vegetación con la corriente principal, disminuyendo exponencialmente conforme se alejan (Philip Roni, Tim Beechie, George Pess, y Karrie Hanson, 2014, p.2)

El reconocimiento del rol ecológico y geomorfológico de la madera ha conducido a grandes esfuerzos a escala para restaurar bosques ribereños y reintroducir la madera dentro de proyectos de restauración fluvial y protección de bancos. Siendo necesario comprender la mecánica y durabilidad de la madera para estos (Tim Abbe y Andrew Brooks, 2011).

2.1.1.1. Consideraciones Biológicas y Ecológicas

La madera en los ríos está estrechamente relacionada con los requerimientos del hábitad y la disponibilidad de comida para especies de peces salmónidos e invertebrados acuáticos, su presencia tiene una importancia crucial para los ecosistemas fluviales. (Agencia de Protección Ambiental de Escocia, 2006).

La madera puede alterar la cantidad de disponibilidad de áreas de desove para salmónidos y otros peces debido al control del tamaño del sustrato, creación de piscinas para adultos y cubierta para

escondarse. Además, al ralentizar el flujo aumenta la retención de nutrientes que sirven de alimento para microorganismos acuáticos.

Aunque muchas investigaciones fueron enfocadas en la madera y peces salmónidos, subsecuentes estudios han documentado funciones de madera para una variedad de peces no salmónidos y especies invertebradas. Muchos de estos estudios indicaron que el perifiton, que se adheriría a la superficie sumergida de los troncos; sirve como una importante fuente de alimentos para invertebrados, renacuajos y algunos peces. Por lo tanto, la producción primaria y secundaria se ve incrementada. (Philip Roni et al., 2014).



Figura 2.2. Árbol depositado en la orilla por acción de las fuerzas de arrastre del Río Amazonas (Iquitos).

2.1.1.2. Influencia Geomorfológica

La geomorfología de un sistema fluvial es ampliamente una función de su régimen de flujo y carga de sedimentos. No obstante, también los restos de madera que carga el río tienen una implicancia significativa sobre él. Se conoce que los cambios de la cantidad de carga de madera pueden alterar la capacidad de transporte de sedimento, rugosidad del lecho y morfología del canal (ver Figura 2.2).

En pequeñas corrientes, la madera que cae al río puede reducir el transporte de carga de sedimentos del lecho; convirtiendo los canales de lecho de roca a canales aluviales o disminuyendo el tamaño del grano del material. Además, una sola pieza de madera puede tener dimensiones que fácilmente exceden el canal mismo; creando pasos que representan la mayoría de las caídas verticales de esta. (Philip Roni et al., 2014).

En canales de mayor envergadura una pieza de madera puede formar el núcleo de acumulaciones más grandes que pueden redireccionar corrientes, alterar la forma plana o aun completamente bloquearla. En ciertos casos, los atascos de madera pueden proteger los bancos de la erosión o fuerza del agua dentro de las llanuras de inundación, creando nuevos canales. (Tim Abbe y Andrew Brooks, 2011).

2.1.2. Proceso de formación de un Atasco de Troncos

La formación de un atasco de troncos empieza generalmente durante una gran avenida del río. En el cual los procesos erosivos sobre las márgenes se incrementan, ocasionando la caída de los árboles que crecen sobre ellas. Estos árboles de distintos tamaños son arrastrados por la corriente, pero algunos debido a su mayor envergadura pueden encontrar la estabilidad en el cauce; y son llamados las piezas claves.

Una pieza logra engancharse y se estabiliza cuando encuentra suficiente resistencia a lo largo del lecho para no moverse aguas abajo. La forma en que se encuentra enganchado, la presencia de fajos de raíces, la densidad de la madera y la elevación del centroide son críticos para este proceso. Un tronco enganchado es más estable con su fajo de raíces puesto aguas arriba, formando un mayor volumen en contra del flujo del río. (Tim Abbe y Andrew Brooks, 2011).

Después de permanecer estable la pieza clave podría llegar a enterrarse mediante un proceso de socavación y sedimentación (ver Figura 2.3). Un entierro o enganche inicia una obstrucción de flujo que puede atrapar escombros móviles y llevarlos a la formación de barras, que pueden seguir su desarrollo hacia una llanura de inundación. Si un tronco clave es incrustado hacia la orilla formará un punto rígido que atraparé más troncos y causará un efecto deflector de flujo similar al de un espigón. Cabe mencionar, que el proceso natural por el cual un tronco se incrusta así mismo dentro del lecho del río, es fundamental para comprender la estabilidad de la madera en grandes canales. (Tim Abbe y Andrew Brooks, 2011).



Figura 2.3. Procedimiento de Entierro de una Pieza Clave.

Fuente: Consideraciones Geomorfológicas, Ecológicas y de Ingeniería cuando usas Madera en Restauración de Ríos, Tim Abbe y Andrew Brooks, 2011.

2.1.3. Concepto de Ingeniería de Atascos de Troncos:

En el año 1995, el término ingeniería de atascos de troncos o su equivalente en inglés “Engineered Log Jams” (ELJ); fue propuesto por el doctor Tim Abbe en 1995 para describir una estructura tipo espigón hecho con troncos. Estos espigones simulaban el diseño natural de un atasco de troncos; y debían implementarse para un terrateniente, con el fin de proteger los bancos del Río Cowlitz al oeste del estado de Washington en Estados Unidos. La suposición fue tomada como una de las más elegantes soluciones a los problemas que pueden ser encontrados en la naturaleza. (Andrew Brooks y Tim Abbe, 2006, p.10).

Posteriormente, el término ingeniería de atascos de troncos (ELJ) se referiría a cualquier grupo diverso de estructuras de madera que ofrecen una efectiva alternativa de restauración de hábitas y tratamiento de problemas tradicionales de ingeniería de ríos tales como erosión de bancos, inundación, daños a puentes e incisión de canales. ELJ es basado en la premisa que la manipulación de ambientes fluviales, ya sea por problemas tradicionales en ingeniería de ríos o restauración de hábitas, es probable que sea más económico y ambientalmente sostenible si el resultado ambiental emula las condiciones y procesos naturales a los que el paisaje y comunidades ecológicas se

adaptaron. Este método es similar al emergente campo del biomimetismo en el cual los sistemas naturales son imitados para solucionar problemas humanos (Agencia de protección ambiental de Escocia, 2006).

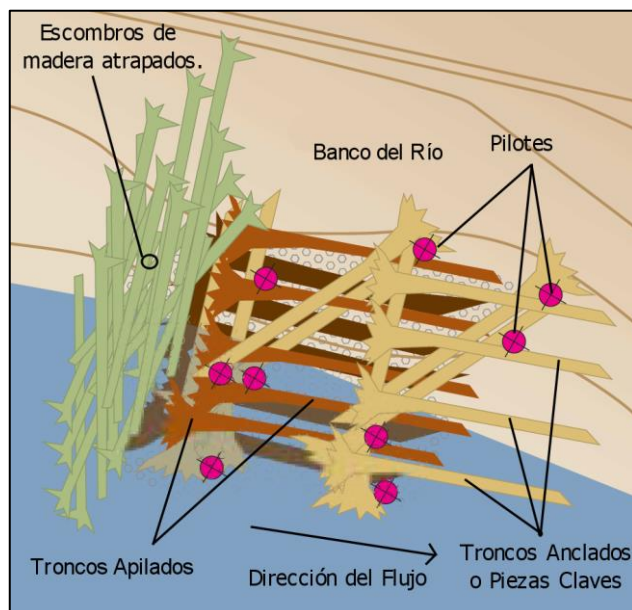


Figura 2.4. Vista en Planta de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.

Modificado de: Manual Nacional de Escombros de Madera, Brooks 2006.

Dentro del tipo de estructuras de ELJ podemos mencionar los que iniciaron esta tecnología, los Espigones Fabricados con Troncos de Árboles. Estos espigones intentan mimetizarse con la naturaleza y pueden ser usados para protección de riberas o para rectificación del cauce. Su geometría de diseño puede variar, según los requerimientos de la problemática del río, pero en general cuentan con tres elementos estructurales para mantener su estabilidad en el cauce; piezas ancladas al banco, troncos en dirección del flujo y pilotes (ver Figura 2.4).

La tecnología de ELJ está emergiendo como un importante nuevo método para ingeniería de ríos en el Pacífico noroeste de los Estados Unidos; como se refleja en recientes premios del Concejo americano de Empresas de ingeniería y la sociedad Americana de Ingenieros Civiles. En donde la tecnología ELJ fue premiada por proveer, de forma ambientalmente sostenible, protección a una carretera principal de la costa oeste a lo largo del Río Hoh en el estado de Whashington (Agencia de protección ambiental de Escocia, 2006).

2.2. ESPIGONES

2.2.1. Definición de espigón:

Los espigones emplazados en ríos son estructuras hidráulicas transversales que ingresan al cauce con una dirección asignada, longitud, forma y espaciamiento; con el fin de ralentizar el flujo en la zona de campo de trabajo de estas y favorecer la sedimentación, o mantener la navegabilidad de un río. Los espigones pueden ser clasificados de acuerdo a distintos criterios como, por ejemplo: de acuerdo a su forma, permeabilidad, el material empleado, su función, etc (ver Figura 2.5).

Mohamed F. M. Yossef (2002) en su publicación “The effect of Groynes on Rivers” de la Universidad Tecnológica de Delft menciona que: “Los espigones son estructuras construidas en un ángulo con el flujo con el fin de desviar la corriente fuera de las zonas críticas. Estos están hechos de piedra, grava, roca o pilotes; empezando en la orilla con un anclaje y finalizando en la línea de regulación con una cabeza. Estos sirven para mantener un canal deseable, para el propósito de control de inundación, mejorar navegación y control de erosión.”



Figura 2.5. Espigones de Bolsacreto.

Fuente: Control de Erosión en Zonas Tropicales, Jaime Suarez Diaz, 2001.

Es necesario mencionar, que la colocación de espigones sobre el cauce influye de forma determinante sobre el flujo y sobre el mismo. “Los espigones incrementan la velocidad del agua al disminuirse la sección del río, aumentando el gradiente y generando macro turbulencia intensa. La turbulencia generada por los espigones puede producir remolinos o vórtices fuertes que generan a su vez socavación, la cual representa un problema de estabilidad para la estructura del espigón.” (Jaime Suarez Díaz, 2001, p.468)

2.2.2. Objetivos y Funciones de los Espigones:

Los objetivos por la cual las estructuras tipo espigón son usadas y tienen ventaja sobre otros tipos de contramedida, son la capacidad de estos para restablecer y crear nuevos alineamientos; así como la capacidad de poder constreñir el flujo (Brown, 1985). Sin embargo, otros tipos de contramedidas pueden proporcionar equivalente o mejor protección en contra de la erosión general de un banco; por ende, es de importancia estudiar su factibilidad dentro de la problemática de un proyecto.

Dentro de los objetivos como menciona el ingeniero Rocha en su libro “Introducción a la Hidráulica de obras viales” publicado en el 2009 podemos mencionar los siguientes:

- Defensas de las márgenes contra erosión. A estos espigones se le llama generalmente retardadores de flujo.
- Formación de un cauce más profundo, con fines de navegación. A estos espigones se le llama deflectores.

- Desviar la corriente. Se usan en problemas especiales.
- Puede haber espigones que cumplan los dos primeros objetivos. Se les llama retardadores – deflectores.

Las funciones de un espigón dependen del objetivo para las cuales han sido diseñadas, En líneas generales podemos tener tres tipos de funciones como señala en la publicación: “**River Training Structures**” auspiciada por Maccaferri Soluciones Ambientales:

Prevención de la Erosión de un Banco:

En particular, un flujo fuerte en una ensenada de un río hace que los sedimentos en los alrededores se muevan, lo que plantea problemas relacionados con la erosión. El principal objetivo de la instalación de los Espigones en los ríos es evitar la rotura de un banco causada por la erosión.

Control de Flujo:

Mediante la instalación de un espigón se esperan dos principales efectos que controlan el flujo. El primer efecto es que un thalweg existente pueda conducirse a otra dirección, así la dirección del flujo será controlada. La otra está relacionada con la disminución de la magnitud de la velocidad cercana a la orilla cóncava de un río. Estos efectos que controlan el flujo causan un flujo concentrado que afecta el calado de un río, que repercute en la navegabilidad de este; y reduce la velocidad cercana a la orilla que tiene como resultado su protección.

Mejoramiento del paisaje y ambiente ecológico:

Un espigón además de ser una técnica de protección de bancos de ríos, mejora el paisaje en los alrededores del mismo. En particular la velocidad de la corriente principal se ve reducida de forma relevante en la zona de trabajo de los espigones. Acorde a este fenómeno, en esta zona se proporcionan no solo varios habitats sino también refugios para peces y microorganismos.

2.2.3. Tipos de Espigones

Los espigones pueden ser permeables o impermeables en el sentido que pueden permitir o no el paso del agua a través de ellos. Los espigones permeables son más efectivos en los ríos que tienen mayor cantidad de carga de fondo y altas concentraciones de sedimentos, debido a que estos espigones facilitan la sedimentación (Ver Figura 2.6). Los espigones impermeables son más efectivos cuando se requiere mantener una profundidad de cauce para navegación, debido a que la socavación es mayor y por lo tanto el cauce va a tener una mayor profundidad (Jaime Suarez Díaz, 2001, p.468).

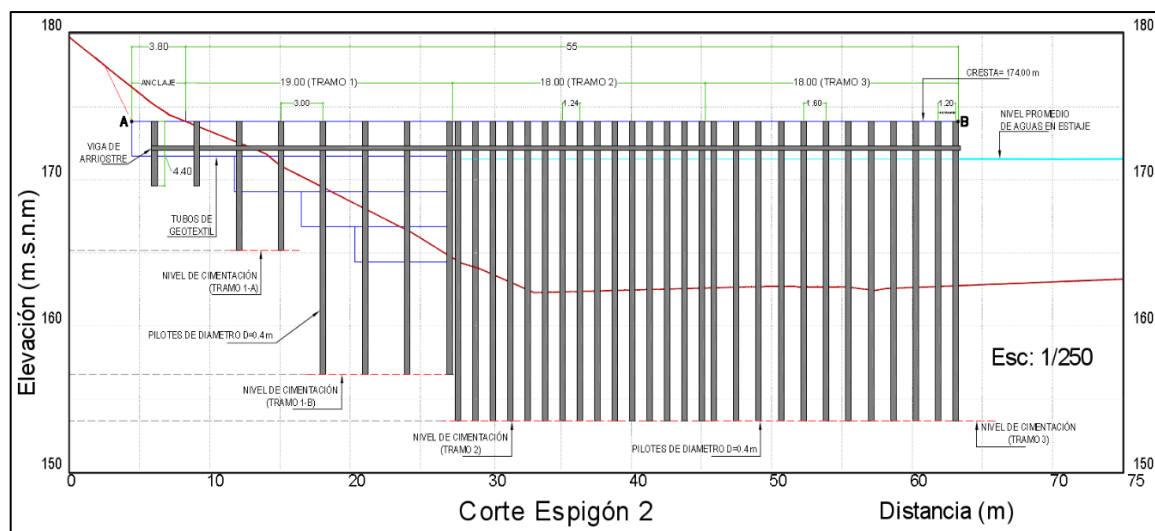


Figura 2.6.- Corte de un Espigón Permeable Hecho de Pilotes.

Fuente: Odebrecht 2011.

Brown en 1985 clasificó a los espigones en tres tipos de estructuras en base al estudio de cientos de espigones en prototipo y en su estudio en modelo físico. Los espigones son clasificados por su función como retardadores, retardadores /deflectores y espigones deflectores. Los dos primeros tipos caen dentro de la categoría de los espigones permeables mientras que los espigones deflectores son impermeables.

- Estructuras retardadoras: Son diseñados para reducir la velocidad del flujo en la vecindad de la orilla o sobre la región de la influencia del esquema de los espigones. Son útiles cuando se desea favorecer la sedimentación y la formación de playas entre espigones. Para pensar en espigones permeables sumergidos la corriente debe tener transporte de sólidos finos en suspensión que puedan depositarse entre los espigones (Rocha, 2009, p.12). Como ejemplo tenemos los espigones hechos de bambú llamadas tipo cerca.
- Espigones Deflectores o desviadores: funcionan para desviar las corrientes de flujo principal lejos del banco del canal y producen en la corriente una mayor perturbación que los espigones permeables. Se usan preferentemente en ríos navegables en los cuales se busca mantener una sección hidráulica central con un determinado calado (Rocha, 2009, p.11). En general la mayoría de espigones hechos de materiales tradicionales, tipo dique, son de esta índole.
- Espigones retardadores – deflectores: Son de menor grado de permeabilidad que los espigones retardadores y por lo tanto producen un flujo desacelerado a lo largo del canal, pero adicionalmente producen una deflexión del flujo lejos del banco.

Breve comentario entre espigones permeables e impermeables encontrado en el artículo publicado en el 2013 y Auspiciado por Beijing University of Aeronautics and Astronautics y el Yellow River Institute of Hydraulic Research: “*The Design and application of permeable groynes*”:

“La principal desventaja de espigones impermeables es el efecto de separación de flujo en la cabeza del espigón, causado por el bloqueo del flujo. Por esta razón, los espigones permeables son propuestos. En ríos aluviales, con considerable carga de lecho y gran concentración de sedimentos, disminuyen las velocidades del flujo cerca al banco, creando rápida deposición en esa área. Los espigones permeables tienen la ventaja de un razonable control del patrón de flujo paralelo al banco dentro del campo del espigón.

Su reciente estudio encontró que los espigones innovadores del tipo permeable darán un nivel de inundación de diseño más baja que los espigones impermeables. El estudio también encontró que los espigones permeables también son efectivos en reducir la corriente de retorno en los campos de espigones y por lo tanto amortiguan la fuerza erosiva a la orilla. Estos espigones tienen también un mejor efecto positivo sobre las embarcaciones que los espigones impermeables pues estos causan menor agitación del agua en el campo de los espigones y también reducen la altura de la onda transmitida.”

Existen otros tipos de clasificaciones basándose en las características físicas del espigón:

- Clasificación de acuerdo al método y materiales de construcción:

Los espigones pueden ser permeables permitiendo que el agua fluya a través de él reduciendo velocidades, o impermeables bloqueando y deflectando la corriente. Los espigones permeables son fabricados de pilotes, bambú o maderas mientras que los impermeables también llamados espigones sólidos son construidos usando roca, grava o gaviones (Mohamed F. M. Yossef, 2005, p.26).

- Clasificación de acuerdo a si está o no sumergido:

Los espigones pueden ser diseñados como sumergidos o no sumergidos. La elección sobre cual usar es dictado por las condiciones de diseño. Usualmente espigones impermeables son diseñados para ser no sumergidos debido a que el flujo por encima del espigón sólido puede causar severa erosión a lo largo del fuste (Shanks). Para condiciones sumergidas, del otro lado, los espigones permeables pueden ser usados; debido al hecho de que perturban el flujo mucho menos que los espigones sólidos. (Mohamed F. M. Yossef, 2005, p.26).

- Clasificación de acuerdo a su apariencia en planta:

Los espigones pueden ser contruidos de diferentes formas. La mayoría de las formas descritas a continuación son generalmente las del tipo de espigones impermeable que son macizos. Para la variedad de estilos de espigones permeables a veces las formas son difíciles de definir y está sujeto a la creatividad y criterio del diseñador. Como ejemplos tenemos (Jaime Suarez Díaz, 2001, p.468):

- Espigón recto formando un ángulo con la orilla y que tiene una cabeza con un sistema de protección contra la socavación en la punta.
- Espigón en forma de T, el ángulo α es generalmente de 90 grados y el dique en la punta es paralelo a la dirección del flujo.
- Espigón en forma de L, que permite mayor espacio para sedimentación entre espigones y menos socavación en su cabeza y son más efectivos para facilitar la navegación.
- Espigones en forma de jockey que poseen huecos los cuales son más extensivos en área que los en forma de T.

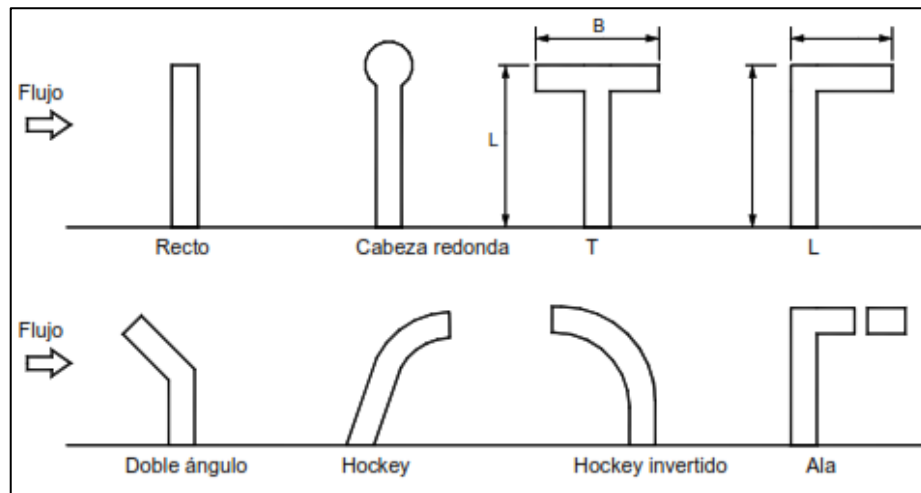


Figura 2.7. Forma en Planta de los Espigones.

Fuente: Control de Erosión en Zonas Tropicales, Jaime Suarez Diaz, 2001.

2.3. CRITERIOS DE DISEÑO DE ESPIGONES

Para el diseño de espigones fabricados con troncos de árboles se usan casi los mismos criterios que en los fabricados de materiales tradicionales y del tipo impermeables, solo excluyendo algunos por la disposición misma de estas estructuras (como por ejemplo ángulo del talud, pendiente de cresta, etc.).

Muchos investigadores han mostrado su interés por estudiar los criterios de diseño de espigones en ríos y ofrecen sus propias recomendaciones, pero no hay nada establecido con respecto a esto. En gran parte, los estudios experimentales de espigones en laboratorios han sido realizados para espigones impermeables colocados en canales curvos y rectos; y son pocos los ensayos para espigones permeables, es así que queda mucho por estudiar en este campo. Entre los muchos criterios, sintetizamos los siguientes: extensión de trabajo de los espigones, permeabilidad, orientación, longitud y espaciamiento.

Debemos tener en cuenta que el buen juicio y experiencia del ingeniero es un factor importante para el diseño de este tipo de estructuras; y que los criterios y recomendaciones dadas por diferentes autores, deben ser evaluados para las condiciones locales del río en el que se piensa trabajar (hidrología, hidráulica, geomorfología).

En general los criterios de diseño para espigones permeables siguen los mismos lineamientos que los espigones impermeables y son mencionados a continuación.

2.3.1. Permeabilidad

Este criterio es de suma importancia para el diseño de espigones permeables. Basándonos en el estudio de Brown en 1985 podemos resumir algunos datos importantes sobre la relación entre permeabilidad y comportamiento del espigón dentro de un río.

La permeabilidad de espigones en el reporte de Brown en 1985 es definida como el porcentaje de la superficie del área del espigón que está abierta o sin obstrucción. La determinación de la permeabilidad del espigón solo requería el cálculo del área del flujo no obstruida dentro de la estructura.

El siguiente es un breve resumen de las conclusiones y recomendaciones del laboratorio del FHWA (Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos) acerca de la permeabilidad del espigón. Esta información puede ser usada para seleccionar una apropiada permeabilidad en una situación de estabilización de bancos:

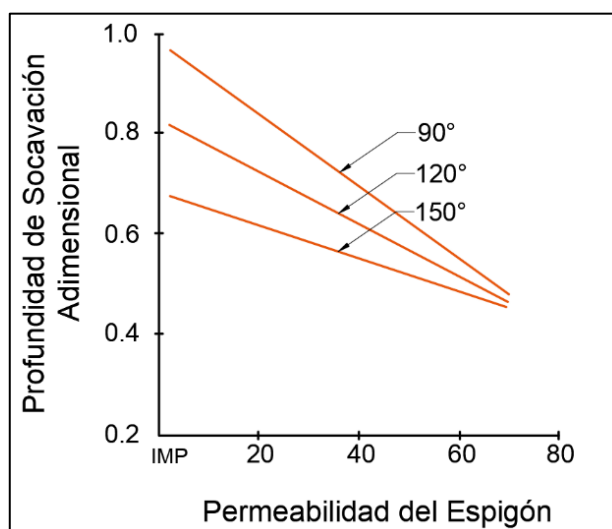


Figura 2.8. Gráfico de Relación entre Profundidad de socavación y permeabilidad.
Modificado de: Diseño de Espigones- Estructuras de Estabilización de Orillas, FHWA,1984.

- a. Un punto de comparación entre espigones de diferentes permeabilidades es la profundidad de socavación aguas abajo de la punta del espigón. Cuando la permeabilidad incrementa, la magnitud de socavación de aguas abajo del espigón disminuye ligeramente en tamaño, pero más significativamente en profundidad. La Figura 2.8 ilustra la relación entre permeabilidad del espigón y profundidad de socavación adimensional del espigón (profundidad de socavación dividida por una profundidad arbitraria para unificar valores), para espigones que tienen longitudes igual al 20 % del ancho del canal. Como puede verse, la profundidad de socavación disminuye con el incremento de la permeabilidad respecto del ángulo del espigón.

La figura también ilustra que espigones impermeables producen el mayor cambio en altura de socavación sobre un rango de ángulos de espigones. Por lo tanto, si una importante consideración de diseño es minimizar el tamaño y profundidad de socavación local solo aguas abajo del espigón, la permeabilidad del espigón debe ser maximizada.

- b. El tipo de estructura vertical usada en el espigón permeable también influye sobre la cantidad de socavación producida aguas abajo de la punta del espigón. Miembros redondos verticales producen menor socavación que miembros cuadrados. Esto implica que todos los miembros verticales deben ser redondos o aerodinámicos para minimizar la socavación local siempre que sea posible.
- c. La Concentración de flujo en la punta del espigón es otra área de comparación entre espigones de varias permeabilidades. Una velocidad adimensional, V'' , definida como la relación entre la velocidad registrada en la vecindad de la punta del espigón y la velocidad de la sección media aguas arriba del espigón; fue usada para definir la concentración de flujo en la punta del espigón. Los hallazgos indicaron que a mayor grado de permeabilidad es más bajo el valor de V'' (ver Figura 2.9).

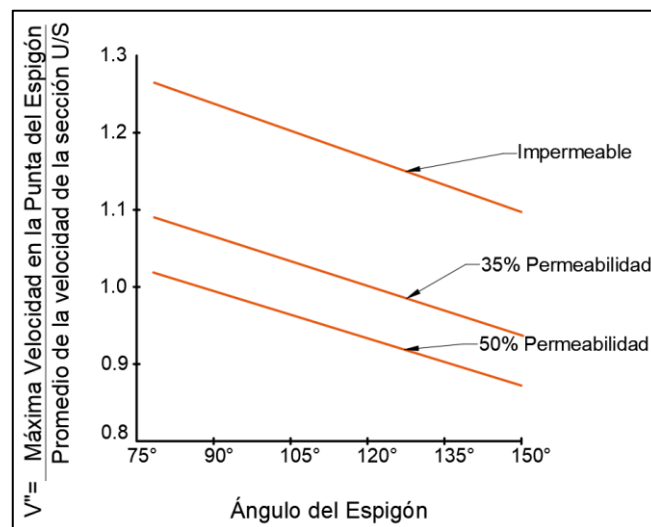


Figura 2.9. Gráfico de Relación entre Ángulo del Espigón y V'' .

Modificado de: Diseño de Espigones- Estructuras de Estabilización de Orillas, FHWA, 1984.

Observe como la curva planteada V'' para espigones impermeables cae significativamente más alto que para las permeables. Además, debemos tener en cuenta que las curvas trazadas para los espigones permeables caen sobre una anchura de banda bastante estrecha, indicando que V'' es menos sensible a los cambios en cuanto a la permeabilidad del espigón cuando el grado es mayor que 35 por ciento que cuando el grado es menor que el 35 por ciento.

Nótese que para ángulos de espigones mayores que 120 grados y permeabilidades mayores que 35 % los correspondientes valores de V'' son menores que 1. Esto indica que la máxima velocidad fuera de la punta del espigón para estos espigones es menor que la velocidad promedio aguas arriba del espigón o que la aceleración del flujo es demasiado pequeña alrededor de la punta del espigón para estas configuraciones de espigones.

Basado sobre esta información, si requerimos minimizar la concentración del flujo fuera de la punta del espigón para un diseño particular, un espigón con una permeabilidad mayor que 35 % debe ser usada. Es importante subrayar que las curvas ploteadas en la figura anterior se basan en datos experimentales colectados en canales artificiales rectos, para espigones con longitudes proyectadas igual al 20% del ancho del canal. Similares tendencia fueron observada para otras longitudes de espigones.

- d. La permeabilidad del espigón afecta la longitud del banco protegido, aguas abajo del mismo. El ángulo de expansión aguas abajo de la punta del espigón fue usado como una medida de la longitud del banco protegido, durante el estudio del laboratorio FHWA. El ángulo de expansión fue definido con el ángulo entre un flujo tangente a la punta del espigón, y una línea entre la punta del espigón y un punto cerca al banco donde el flujo se reexpandió para impactarlo. La Figura 2.10 indica que el ángulo de expansión incrementa con el incremento de la permeabilidad en todas las instancias. Es decir, que a más permeable el espigón, es menor la longitud del banco del canal protegido aguas abajo de los espigones.

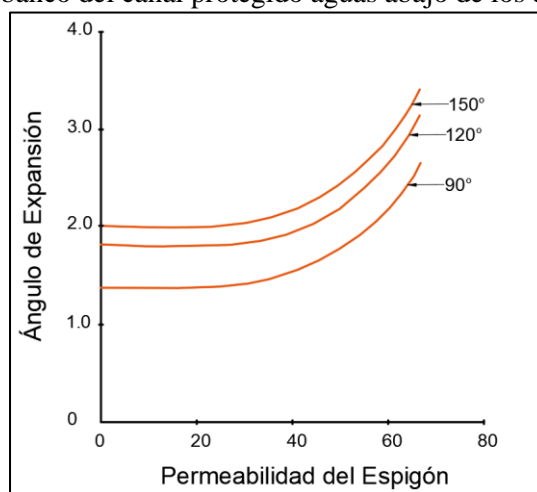


Figura 2.10. Gráfico de Relación entre Ángulo de Expansión y Permeabilidad del Espigón.

Modificado de: Diseño de Espigones- Estructuras de Estabilización de Orillas, FHWA, 1984.

- e. Una adicional observación de los estudios de laboratorio por FHWA relativo a la permeabilidad del espigón, es la diferencia en el impacto causado por el flujo por encima del espigón. Durante los estudios del laboratorio, se encontró que debido a que las etapas de flujo exceden la cresta del espigón, inmediatamente aguas abajo del espigón hay una excesiva cantidad de turbulencia en la vecindad de la raíz del mismo; que resulta en erosión de porciones de la parte superior del canal. Este disturbio del banco fue mucho más evidente para los espigones impermeables investigados que para los permeables.

Así mismo se menciona algunas experiencias y recomendaciones:

- La permeabilidad de los espigones de hasta 50 % es aceptada donde cada una de las variables anteriores es moderada.
- Donde es necesario proporcionar una reducción importante de la velocidad del flujo, un nivel alto de control de flujo, o cuando la estructura está siendo usada en una curva cerrada; la permeabilidad del espigón no debe exceder el 35 %.
- En ambientes donde solo se requiera una reducción suave de la velocidad, donde se necesita la estabilización de bancos sin una importante cantidad de control de flujo, o en canales con curvas suaves; espigones que tienen permeabilidad de hasta un 80% han sido usados efectivamente.

2.3.2. Extensión de trabajo

La extensión de la orilla que se requiere proteger en una típica curvatura erosionada ha sido estudiada por muchos investigadores. Se ha encontrado que una concepción errónea de la extensión de protección de las orillas, conlleva a proporcionar de forma distorsionada una protección muy aguas arriba y no lo suficientemente lejos aguas abajo (Brown, 1985).

Los criterios para establecer la extensión a proteger de un banco de río han sido desarrollados por la Corporación de Ingenieros del Ejército Estadounidense (1981). Estos criterios son basados en una serie de modelos estudiados para definir de mejor forma los límites de protección de bancos. Desde estos estudios, se concluyó que la mínima distancia para la extensión de protección son una distancia aguas arriba de 1.0 el ancho del canal y una distancia aguas abajo de 1.5 veces el ancho del canal. Unos similares límites de protección fueron encontrados por FHWA (1983); sin embargo, se encontró un límite aguas abajo de 1.1 veces el ancho del canal. El estudio de la FHWA no fue, sin embargo, tan extenso con respecto al estudio anterior.

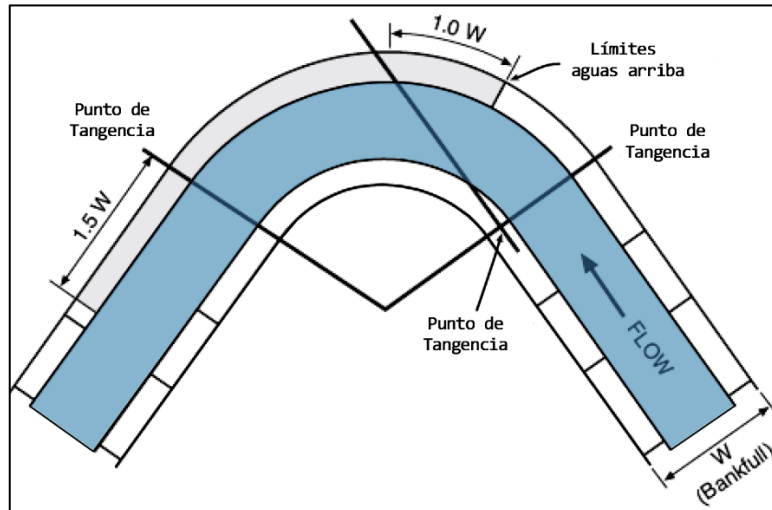


Figura 2.11. Extensión de protección requerida en un canal curvo USACE (1981).

Fuente: Entrenamiento de estructuras de Río, Maccaferri, sf.

Los criterios anteriores son basados en análisis de condiciones de flujo en curvas de canales simétricos bajo ideales condiciones de laboratorio. Las condiciones del mundo real son raramente simples. Un diseñador encontrará los anteriores criterios difíciles de aplicar en curvas leves o en canales que tienen irregulares o curvas no simétricas. También, otras estructuras (tales como pilares de puente) podrían estar produciendo un efecto estabilizador sobre la curva; así que solo una parte de la curva necesitará ser estabilizada.

Además, la magnitud o naturaleza del evento de flujo podría solo causar problemas de erosión en una muy localizada porción de la curva, requiriendo otra vez que solo una longitud de canal corta sea estabilizada. Sin embargo, los anteriores criterios deberían ser solo usados como un punto de inicio. Un análisis adicional de los factores específicos del sitio definirá la actual extensión de protección requerida (Brown, 1985).

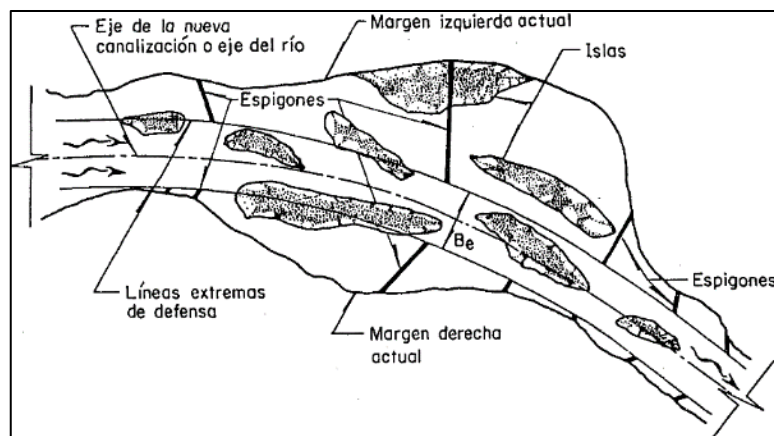


Figura 2.12. Trazo del eje del río y líneas extremas de defensa en una rectificación.

Fuente: Estabilización y rectificación de Ríos, Maza Álvarez, 1989.

2.3.3. Trazo en Planta:

Luego de tener los alcances de extensión del proyecto es importante también hallar el alcance de trabajo de los espigones, es decir, hasta donde se extenderán dentro del río de tal modo que influyan en menor rango sobre las condiciones naturales del mismo. Para lo cual es necesario encontrar el nuevo alineamiento del río, el cual se ajusta geométricamente con círculos con diferentes radios de curvatura.

Sobre este asunto Jaime Suarez Díaz en su publicación “*Control de Erosión en Zonas Tropicales*” en el 2001, citando a Maza Álvarez, nos resume los siguientes criterios:

- a) Al proyectar una obra de defensa ya sea protegiendo la orilla actual, o bien, en una margen nueva (al hacer una rectificación) se requiere trazar en planta el eje del río y en las orillas dibujar una línea paralela al eje a la cual llegarán los extremos de los espigones. La longitud de cada espigón, estará dada por la distancia de la orilla real a esa línea. La separación entre las nuevas orillas, es decir el ancho B, estará dado por el estudio de estabilidad de la corriente, el cual tomará en cuenta si el tramo será navegable, el cambio de pendiente si se rectifica el río, etc. (Ver Figura 2.12)
- b) Cuando se trata de una rectificación en cauces formados por arenas y limos, conviene dentro de lo posible, que los radios de las curvas nuevas, medidos hasta el eje del río tengan la longitud R siguiente:

$$2.5 B < R < 8B$$

Dónde: R = Radio de Curvatura, B = Ancho del río

Al respetar los radios anteriores, la defensa que se haga sobre la base de espigones, trabajará eficientemente. Si los radios de curvatura son menores, la separación de los espigones disminuye y económicamente es preferible construir una defensa marginal apoyada en la orilla. Si los radios son mayores, el río tiende a formar un cauce con menores radios dentro de la curva y no todos los espigones trabajan eficientemente.

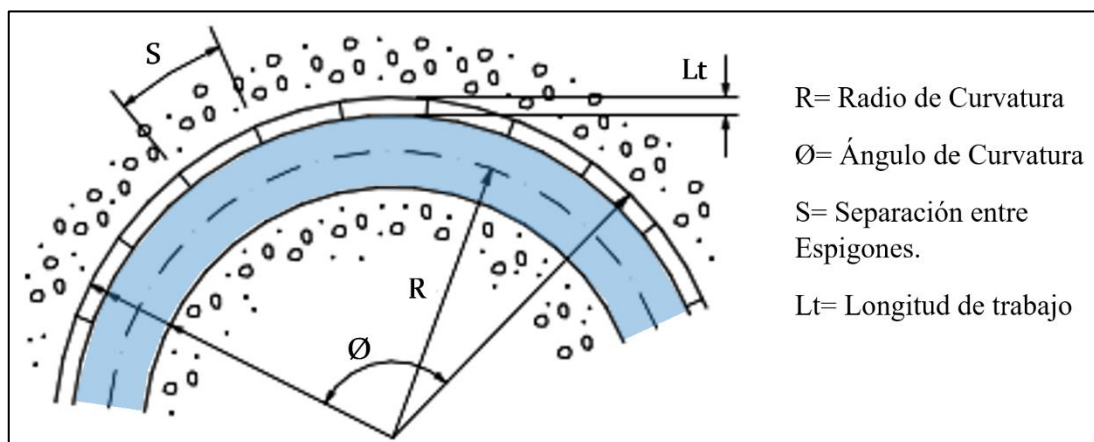


Figura 2.13. Río con un solo radio de curvatura.

Fuente: Control de Erosión en zonas Tropicales, Jaime Suarez Diaz, 2001.

- c) Cuando solo se desea proteger las orillas actuales de un río, y no se desea hacer trabajos de rectificación, la línea que une los extremos de los espigones deberá trazarse lo más uniformemente posible, aunque no necesariamente tendrá un radio único. Los proyectos de este tipo son los más comunes en la primera etapa de desarrollo de una región ya que se trata de fijar las orillas al menor costo posible. La selección de la línea que une los extremos de los espigones incluye en la longitud de los mismos y ésta, junto con la orientación que se les dé, determina la separación, entre ellos. Por lo tanto, es indispensable estudiar varias localizaciones en esa línea.
- d) Si una curva es trazada con varios radios de curvatura, el tamaño de dichos radios debe decrecer hacia aguas abajo. Si no se cumple con esta recomendación el flujo podrá separarse de la margen exterior, dando lugar a la formación de bancos de arena cercanos o adyacentes a la margen cóncava.

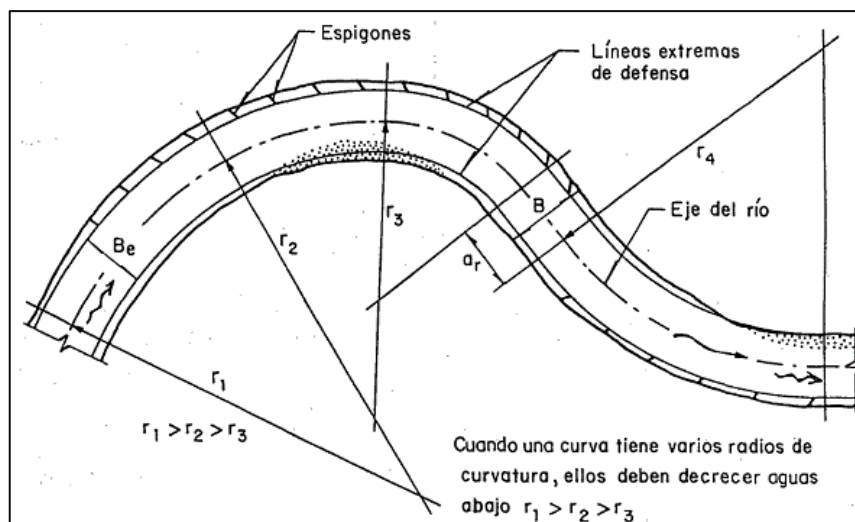


Figura 2.14. Curva con distintos radios de curvatura.

Fuente: Estabilización y rectificación de Ríos, Maza Álvarez, 1989.

e) Al protegerse, ya sea una sola curva, o un tramo completo, los primeros tres espigones de agua arriba deben tener longitud variable. El primero deberá ser de la menor longitud posible (igual al tirante), y los otros aumentar uniformemente, de tal manera que el cuarto tenga ya la longitud del proyecto. La pendiente longitudinal de la corona debe ser uniforme en todos ellos y por lo tanto la misma de los demás espigones.

f) Por último, conviene aclarar que, aunque la línea teórica que une los extremos de los espigones pueda tener diversos radios de curvatura, nunca deberá tener un tramo en que su radio de curvatura se mida hacia la orilla exterior. Todos los radios de esa línea se deberán medir hacia el mismo lado; es decir, hacia el interior de la curva.

2.3.4. Longitud de los espigones:

La longitud de los espigones depende de la localización, propósito, espaciamiento y economía de construcción. La longitud total de los espigones incluye la longitud de anclaje que permanece empotrada al banco y la longitud de trabajo que está dentro del flujo. La longitud de trabajo de los espigones viene dada desde la etapa de trazo en planta donde se decide los nuevos alineamientos del río y la cantidad de orilla que se quiere recuperar.

Podemos citar a Maza Álvarez cuyas recomendaciones sobre longitud del espigón son válidas para espigones impermeables. Él define la longitud del espigón como la suma de dos longitudes denominadas longitud de empotramiento “ L_e ” y longitud de trabajo “ L_t ”:

$$L = L_e + L_t$$

Donde la longitud de trabajo de los espigones, aquella que está dentro del cauce, está dada por su distancia entre el cruce de la margen con la corona del espigón y la línea extrema de defensa; y normalmente debe estar comprendida entre los siguientes límites.

$$d \leq L_t \leq \frac{B}{4}$$

En esta relación B es el ancho del río y “d” es el tirante o profundidad asociado al gasto formativo en el sitio donde se construirá el espigón. En los ríos de planicie es igual a la distancia vertical entre la elevación de la margen y la elevación del fondo del río.

Los espigones pueden o no empotrarse, en el último caso la longitud de empotramiento L_e será igual a 0; Maza recomienda que la longitud de anclaje sea como máximo un cuarto de la longitud de trabajo. De esta forma la longitud máxima de un espigón es:

$$L_{max} = 1.25 L_t$$

Desde otra perspectiva podemos mencionar algunas recomendaciones de diseño para el caso de espigones permeables con respecto a longitud de trabajo de los espigones, basándose en estudios realizados por Brown en 1984 para la FHWA. Durante estos estudios fue mostrado que la longitud de permeables e impermeables espigones impacta la profundidad de socavación en la punta del espigón, la magnitud de concentración de flujo en la punta del espigón, la longitud de orilla protegida por espigones individuales y la aparente corriente del ángulo de deflexión causado por los espigones.

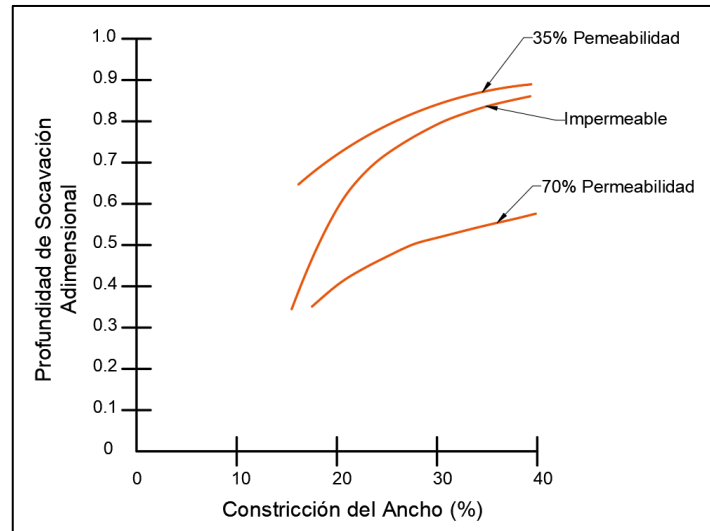


Figura 2.15. Gráfico de Relación entre Profundidad de socavación adimensional y ancho restringido.

Modificado de: Diseño de Espigones- Estructuras de Estabilización de orillas, FHWA,1984.

En la Figura 2.15, una profundidad de socavación es usada para ilustrar la tendencia entre longitud de espigones y profundidad de socavación. La profundidad de socavación adimensional es definida como la profundidad de socavación dividida por una arbitraria profundidad para unificar los valores. Como indica la figura, cuando la longitud del espigón incrementa la profundidad de socavación incrementa y la tasa de incremento de la profundidad de socavación disminuye. Por lo tanto, si deseamos minimizar la profundidad de socavación, la longitud del espigón debería ser minimizada.

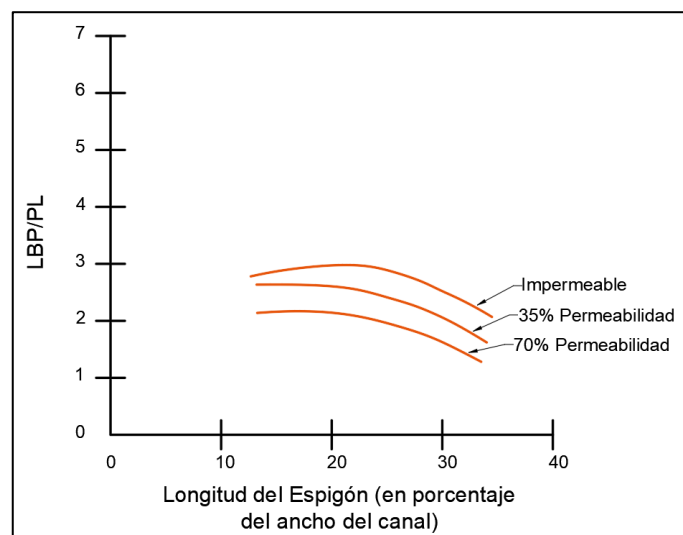


Figura 2.16. Gráfico de Relación LBP/PL y Longitud del Espigón en Porcentaje del Ancho del Río.

Modificado de: Diseño de Espigones- Estructuras de Estabilización de orillas, FHWA,1984.

Otro importante parámetro de diseño es la longitud de banco del canal protegido por espigones. Para definir esta relación el término longitud de banco protegido dividido por la longitud del espigón proyectado (LBP/PL), fue evaluada. La tendencia ilustrada para espigones impermeables indica que LBP/PL incrementa ligeramente con la longitud proyectada del espigón a un máximo de aproximadamente 20 % del ancho constreñido, y entonces disminuye (ver Figura 2.16). Esto implica que una óptima longitud de los espigones existe en una restricción del 20 % de la longitud del ancho del río. El incremento del valor de LBP/PL al máximo de 20 % es pequeño, sin embargo, no indica una importante ventaja con respecto al 20 % sobre longitudes más cortas. Los datos recogidos de experimentos de espigones permeables no indicaron un máximo similar. La tendencia de los espigones permeables es que, a una mayor longitud, es más pequeña la relativa longitud del banco protegido.

La figura también indica que el valor de LBP/PL permanece constante para espigones permeables e impermeables hasta una longitud de alrededor del 20 % del ancho del canal. La importancia de esto es que un espigón que tiene una longitud no mayor que el 20% del ancho del canal debería ser usado para maximizar la longitud del banco por proteger por unidad de longitud proyectada.

Brown también adiciona algunas observaciones de espigones instalados en campo e indica que la longitud del espigón proyectada usada exitosamente varía desde el 3 % del ancho del canal a aproximadamente el 30 % del ancho del canal. El rango más común, sin embargo, es de 10 a 20 %. Los espigones impermeables generalmente caían en el extremo inferior de este rango, con longitudes usualmente inferiores al 15 por ciento del ancho del canal. Los espigones permeables fueron comúnmente encontrados con longitudes hasta 20 a 25 % del ancho del canal. Sin embargo, la longitud efectiva de un espigón permeable es una función de la permeabilidad, y solo las estructuras más permeables fueron más efectivas en longitudes más grandes.

2.3.5. Orientación de los espigones

La orientación de los espigones está dada por el ángulo que forman con respecto a la corriente principal, y se definen tres tipos: Espigones aguas arriba cuyo ángulo es menor que 90 grados, espigones rectos con un ángulo de 90 y espigones aguas abajo con un ángulo mayor a los 90 grados.

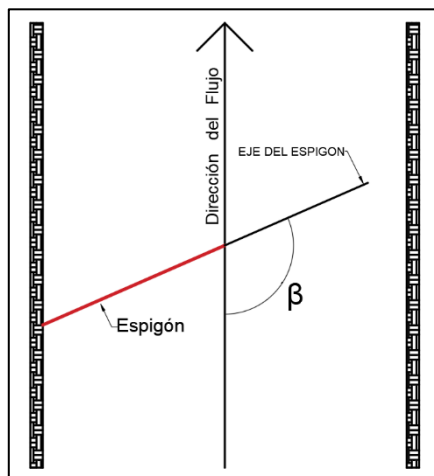


Figura 2.17. Definición del ángulo de orientación (β) de un Espigón.

Cada orientación de los espigones afecta a la corriente de distintas formas y resulta en diferentes formas de deposición en la vecindad de los espigones (zona de campo de espigones). De acuerdo a la disposición del ángulo de inclinación un espigón orientado hacia aguas abajo atraerá la corriente hacia al banco mientras que uno orientado aguas arriba la alejará.

De la publicación de Maccaferri "*Diseño de Estructuras de Río*" podemos resumir algunas recomendaciones de acuerdo a su orientación:

- a) En la orilla aguas abajo del espigón y también en la zona aguas arriba del mismo, donde se forma un remolino inverso que produce un asentamiento de la carga suspendida; un espigón que está

orientado hacia arriba causa más deposición que uno perpendicular. La cantidad de deposición entre espigones es máxima en caso de una orientación aguas arriba, debido a su habilidad para proteger los bancos aguas arriba y aguas abajo de ellos mismos. Por lo tanto, los espigones de esta clase son más seguros para protección de bancos y propósitos de sedimentación.

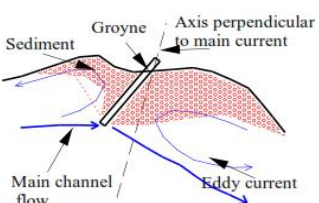
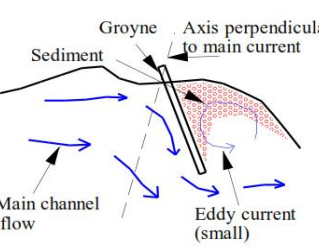
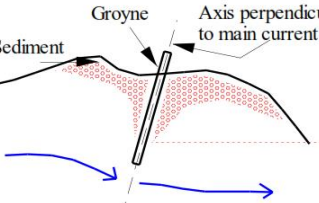
b) Los espigones mirando hacia aguas abajo no son seguros para propósitos de protección debido al efecto de atracción sobre el flujo. EL flujo hacia la raíz del espigón aguas abajo amenaza el área del banco como también los espigones en sí mismos. Del otro lado, para propósitos de mantenimiento del canal para mejorar la navegación, un mejor comportamiento es obtenido por los espigones orientados de forma perpendicular y hacia aguas abajo.

c) Los espigones que son perpendiculares al flujo tienen protección sobre una pequeña área. Se usan generalmente como espigones impermeables para favorecer la formación de un canal central de navegación en un río. (Rocha, 2009, p. 19)

d) Espigones retardadores (permeables) son usualmente diseñados para proporcionar un flujo retardado cerca a la orilla, y desempeñan esta función de igual forma sin respetar el ángulo de los espigones. Ya que los espigones orientados normal al banco y proyectados una longitud asignada dentro del canal son más cortos que en los de cualquier otra orientación, todos los espigones retardadores deberían ser construidos en un ángulo de 90° con el banco por razones económicas.

e) Los espigones más aguas arriba deberían ser angulados aguas abajo para proporcionar una suave transición de las líneas de flujo cerca al banco y minimizar la socavación en la nariz de los espigones líderes. Subsecuentemente los espigones aguas abajo deberían todos establecerse normal a la línea del banco para minimizar costos de construcción.

Tabla 2.1. Comentarios sobre la orientación de los Espigones (USDA, 1995).

Orientación	Esquema	Comentarios
Espigón apuntando aguas arriba.		<p>Captura de sedimentos aguas arriba y aguas abajo de la estructura.</p> <p>Empuja la corriente principal fuera de los bancos.</p> <p>Potenciales problema de socavación en la cabeza.</p>
Espigón apuntando aguas abajo.		<p>Atrae sedimentos solo aguas abajo de la estructura.</p> <p>No forma muchos vórtices y atrae la corriente hacia el banco.</p> <p>Tiene bajo potencial para la socavación en la cabeza.</p> <p>Definitivamente no es recomendado para curvas concavas.</p>
Espigón perpendicular a la dirección del flujo.		<p>El espigón atrae una cantidad moderada de sedimentos aguas arriba y aguas abajo.</p> <p>Mantiene la corriente mas o menos paralela al banco.</p> <p>Tiene un potencial medio para problemas de socavación en la cabeza.</p>

Podemos finalmente mencionar que la orientación del espigón afecta la profundidad de socavación en la punta de los espigones, es así que un espigón orientado aguas arriba posee una mayor socavación que uno perpendicular y en mayor grado que uno orientado aguas abajo. En la siguiente Tabla 2.1 recogida de la publicación: “*The Use Of Groynes For Riverbank Erosion Protection*” del

Departamento de Agricultura del Cabo Oeste de Sudáfrica (USDA) proporciona un esquema y comentarios con respecto a cada orientación.

2.3.6. Separación entre los espigones

La separación de espigones está relacionada íntimamente con la longitud de los espigones que dependen de la localización, propósito y economía de su construcción. El espaciamiento de espigones es a menudo expresado como un “n” veces la longitud proyectada. Si la longitud del espigón es pequeña entonces el espaciamiento es cercano y el costo de construcción puede ser inviable. Si la longitud del espigón es muy grande, el espaciamiento puede ser demasiado grande y puede formarse un suave meandro entre los espigones.

Autores como Maza Álvarez (1989) y Brown (1985) utilizan el ángulo de desviación de flujo para su espaciamiento, de esta condición la separación entre espigones dependerá en gran medida de la longitud del espigón, orientación del espigón, del ángulo de desviación de flujo y del grado de curvatura del río. La elección del ángulo de desviación de flujo es un factor importante para determinar la separación, pero está sujeta al criterio del diseñador, un mayor ángulo de desviación de flujo causará una menor separación; mientras que un ángulo menor alejará más a los espigones. A continuación, se resume algunas conclusiones de estudios sobre espaciamiento entre espigones:

a) Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA,1984):

El espaciamiento de espigones en una protección de banco es una función de la longitud del espigón, ángulo y permeabilidad, como también del grado de curvatura.” En este estudio se utilizó el parámetro de ángulo de expansión de flujo aguas debajo de la punta del espigón que representa de mejor forma la longitud del banco protegido. El ángulo de expansión de flujo es definido como el ángulo entre un flujo tangente a la punta del espigón y una línea que une la punta del espigón y el punto sobre el banco del canal donde el flujo se expande para impactarlo (ver Figura 2.18).

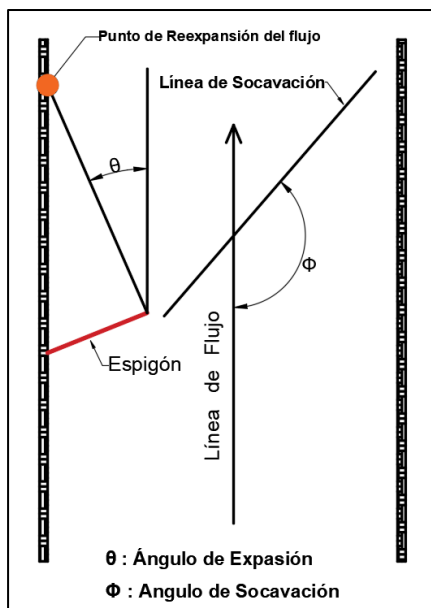


Figura 2.18. Definición del ángulo de Expansión de Flujo.

Modificado de: Diseño de Espigones- Estructuras de Estabilización de orillas, FHWA,1984.

Los resultados de esta investigación indicaron que, para un espigón con una permeabilidad asignada, el ángulo de expansión de flujo aguas abajo de la punta del espigón varió solo con la longitud del espigón. La Figura 2.19 ilustra la relación encontrada entre longitud del espigón y el ángulo de expansión de flujo para varias permeabilidades. Como indica la figura el ángulo de expansión de flujo para espigones impermeables es casi constante en un valor de 17 grados. En contraste, el ángulo de expansión de flujo para los espigones permeables incrementa exponencialmente con la longitud de espigones proyectada.

Para longitudes de espigones aproximadamente menores al 18 % del ancho del canal, los espigones que tienen una permeabilidad de 35 % producen aproximadamente el mismo ángulo de expansión que los espigones impermeables. Esto indica que estos protegen aproximadamente la misma longitud de banco que los impermeables. Además, cuando la permeabilidad del espigón incrementa existe un incremento del ángulo de expansión de flujo que indica que la longitud del banco protegida por los espigones disminuye.

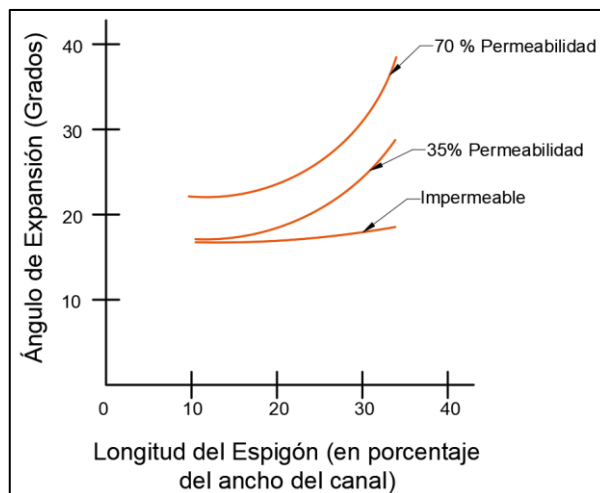


Figura 2.19. Relación entre Longitud del Espigón como Porcentaje del Ancho del Canal y el Ángulo de Expansión de Flujo.

Modificado de Diseño de Espigones- Estructuras de Estabilización de Orillas, FHWA,1984.

b) Jaime Suarez Díaz en su publicación: *Control de Erosión en Zonas Tropicales* en el 2001: Generalmente la distancia entre espigones está relacionada con el ancho del río la longitud del espigón, la velocidad del flujo, el ángulo α y la curvatura de la orilla. Además, los espigones permeables pueden ser espaciados a mayores distancias que los impermeables (Jaime Suarez Diaz, 2001, p. 472).

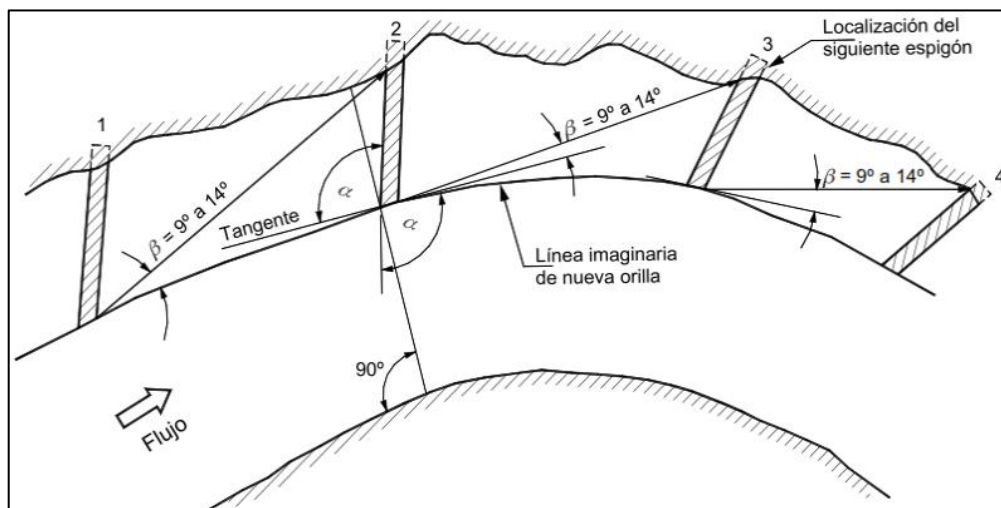


Figura 2.20. Esquema de Diseño de Espigones.

Fuente: Control de Erosión en zonas Tropicales, Jaime Suarez Diaz, 2001.

- Separación en curvas: Para la localización de espigones en curva Maza (1989) recomienda suponer un ángulo β de 9° a 14° de desviación de la corriente para la colocación del siguiente espigón. La separación S_p , entre espigones colocados en curva, conviene controlarla gráficamente como se indica en la Figura 2.20. Si la curva es regular y tiene un único radio de curvatura la separación que se ha probado con buenos resultados es $S_p = (2.5 \text{ a } 4) L_t$; para radios de curvatura mayores de cuatro

B (ancho del río) se han usado separaciones de 4 Lt. Si la curva es irregular o con un radio de curvatura pequeña la separación de espigones necesariamente debe encontrarse en forma gráfica. (Jaime Suarez Díaz, 2001, p. 473).

Tabla 2.2. Recomendaciones de espaciamiento en curvas. Fuente: Control de Erosión en zonas Tropicales, Jaime Suarez Diaz, 2001.

α	Lt	Sp teórico en función Lt	Sp teórico en función Lt	Sp recomendable	
				Empotrado	No empotrado
60	1.15 Lto	5.7 - 6.9	5.0 - 6.0	6 Lt	5 Lt
70	1.06 Lto	5.4 - 6.6	5.1 - 6.3	6.3 Lt	5 Lt
90	Lto	5.1 - 6.3	5.1 - 6.3	6.3 Lt	5 Lt

Donde: $Lt * \sin(\alpha) = Lto$

- Separación en tramos rectos: Cuando se requieran construir espigones en tramos rectos y sin empotramiento en la margen, la separación deberá ser la siguiente:

Tabla 2.3. Recomendación de separación en tramos rectos. Fuente: Control de Erosión en zonas Tropicales, Jaime Suarez Diaz, 2001.

Ángulo de orientación	Separación Sp
90° a 70°	(5.1 a 6.3) Lt, (5.2 a 6.4) Lto
60°	(5 a 6) Lt, (5.7 a 6.9) Lto

Donde : $Lt * \sin(\alpha) = Lto$

c) En la publicación “*Espaciamientos de espigones Rectos en serie*” realizada por Syed Abdus Sobhan y Swapan Kumar Das en 1999 :

En esta investigación se estudió de forma experimental el banco izquierdo de Río Ganges de aproximadamente 2 km de longitud que estaba amenazado por la erosión. Este tramo del río tenía un alcance más o menos recto y estaba ubicado en el distrito de Chapai – Nawabganj en el país de Bangladesh. En el modelo físico se realizaron 12 ensayos conducidos con una serie de espigones impermeables, cambiando la longitud y espaciamiento en cada ensayo. El espaciamiento de los espigones fue optimizado de tal forma de que se disminuyeran las velocidades cerca al banco.

De las extensas observaciones en el modelo, se concluyó que un espaciamiento de 4.5 a 5 veces la longitud de espigones y con bancos cubiertos con rip rap y vegetación; debe ser usado para el diseño de este tipo de espigones en serie para un canal más o menos recto. El diseñador puede usar estos valores para propósitos de diseño y debería verificar la efectividad en campo. Para cualquier caso estos valores deben ser optimizados a través de investigación en modelos físicos.

d) En la publicación: “*Estudios del Espaciamiento de Espigones Permeables*” realizado por Rahul Kumar Tambe, Deepali Kulkarni y S.D. Talegaonkar de la Bharti Vidyapeeth Deemed University (BVDU) concluyó lo siguiente:

Se estudió un tipo de espigones permeables llamados “Goad” cuyos ángulos de orientación estaban situados entre 105 a 120 grados. Los análisis se dirigieron en el laboratorio hidráulico BVUDCOE Pune en un canal de inclinación de 10 metros de largo, 0,30 de ancho y 0,45 de metro de altura. Se usó modelos de acrílico que tenían diferentes permeabilidades de alrededor del 70%, 60%, 50% y 0%. La longitud de los espigones permeables variaba entre el 15 % al 20 % del ancho del canal.

Este estudio se llevó a cabo guiándose de los criterios de diseño para espaciamientos, dados por la FHWA. En donde el espaciamiento de espigones en un esquema de protección de bancos es una función de la longitud, ángulo y permeabilidad del espigón. Desde la observación de este estudio se concluyó que un espaciamiento de 4.5 a 5 veces para el diseño de este tipo de estructuras en serie en un canal recto es el recomendado. Además, se agregó que este espaciamiento podría ser optimizado

mediante el estudio de modelos físicos, lo que podría asegurar un diseño técnicamente viable y económicamente viable.

Tabla 2.4. Recomendaciones de Espaciamiento mejoradas del Technical Report-Hydraulics Research Wallingford- SR229.

Referencia	Tipo de Banco	Espaciamiento	Comentario
Grant, 1948	Cóncavo	3 L	-
UNECAFE, 1953	Cóncavo	1 L	Práctica en general
UNECAFE, 1953	Convexo	2 a 2.5 L	Práctica en general
Richardson y Simons, 1973	Cóncavo	4 a 6 L	El banco puede necesitar riprap
Neil, 1973	Ambos	2 a 4 L	-
Jansen et al, 1979	Ambos	$< 0.6 d^{4/3} / 2gn^2$	Pruebas en modelo en el DHL
Los Angeles District, 1980	Recto	2 L	El banco debe ser protegido con riprap
Los Angeles District, 1980	Cóncavo	1.5 L	El banco debe ser protegido con riprap
Los Angeles District, 1980	Convexo	2.5 L	El banco debe ser protegido con riprap
Garg et al.1980	Ambos	3 a 4 L	Orientación Aguas Arriba
Maccaferri, 1980	Cóncavo	4 L	Gabiones
Maccaferri, 1980	Convexo	6 L	Gabiones
Copeland,1983	Cóncavo	Hasta 3 L	El banco puede necesitar riprap
Bognar y HanKo, 1987	Ambos	1.2 L	Máxima sedimentación
Alvarez, 1989	Recto	4 a 6 L	Para curvas irregulares, espaciamiento encontrado gráficamente.
Alvarez, 1989	Cóncavo	2.5 a 4 L	
Salkov , 1987	Cóncavo	7 a 10 L	-

2.4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE UN ESPIGÓN DE MADERA

Hay un riesgo o percepción de riesgo asociado a la madera como material para la construcción de obras de protección de ríos, debido a su flotabilidad en el agua que hace que pueda ser desplazado hacia aguas abajo o hacia la llanura de inundación del lugar donde se concibió en el planeamiento. Para asegurar que una estructura hecha de troncos de madera encuentre las restricciones de movimiento y riesgos asociados, es necesario recurrir a un análisis de estabilidad. (Knutson & Fealko, 2014).

Existen dos tipos de fuerzas a las que está sometido un espigón fabricado de madera, las primeras son llamadas fuerzas actuantes y las otras fuerzas resistentes, y bajo este enfoque se producen momentos actuantes y momentos resistentes (ver tabla 2.5).

Tabla 2.5. Fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan en una estructura de madera.

Fuerzas Desestabilizadoras o actuantes	Fuerzas Estabilizadoras o Resistentes
Empuje	Fricción
Arrastre	Empotramiento de la Estructura
Sustentación (Lift)	Lastre o Peso
Diferencia de Fuerzas Hidrostáticas	Pilotes
	Anclajes (cables)

Para analizar su estabilidad, sujeto al criterio del diseñador, existen dos formas de hacerlo: La primera es analizar la estructura de forma individual como lo aplica el ingeniero Rafferty, es decir hacer un análisis de balance de fuerzas y momentos para cada miembro y la segunda considerarla como un todo (Wright, Brooks, TS14J, Large Woody National Manual, Knutson and Fealko, Shields). El primero es más apropiado para estructuras simples como las llamadas en inglés “Toe Revetments”. El segundo es más apropiado para estructuras más complejas como es nuestro caso.

El análisis de estabilidad como parte del diseño de estructuras de madera usa factores de seguridad debido a la incertidumbre que existe con respecto a las características hidráulicas, respuestas del canal, cálculo de fuerzas resistentes y actuantes, y potencial reclutamiento de palizada. Estos factores de seguridad son el promedio entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes, su valor nos indicará si la estructura tiene una respuesta positiva a las fuerzas desestabilizadoras.

Estos factores han sido estudiados por norteamericanos en ríos de Estados Unidos y Canadá; pero se debe tener algún tipo de reserva al usarlos en Perú debido a que las características hidráulicas de nuestros ríos no son las mismas. Knutson y Fealko citan el estudio de D’Aoust y Millar (2000) cuya Tabla se muestra a continuación :

Tabla 2.6. Coeficientes De Seguridad. Fuente: Large Woody Material -Risk Based Design Guidelines, knutson y Fealko, 2013.

Riesgo de seguridad pública	Riesgo de daño a la propiedad	Criterio de diseño de flujo	Deslizamiento (FS)	Flotabilidad (FS)	Rotación y Vuelco (FS)	Coef. de Importancia
Alto	Alto	100- años	1.75	2	1.75	1
Alto	Moderado	50-años	1.5	1.75	1.5	0.9
Alto	Bajo	25-años	1.5	1.75	1.5	0.8
Bajo	Alto	100-años	1.75	2	1.75	0.7
Bajo	Moderado	25-años	1.5	1.75	1.5	0.6
Bajo	Bajo	10-años	1.25	1.5	1.25	0.5

De la tabla anterior podemos apreciar que la elección de los factores de seguridad depende del riesgo de seguridad pública y a la propiedad, y del periodo de diseño. Además, encontramos 4 tipos de factores de seguridad: deslizamiento, flotabilidad, rotación y vuelco. Bajo un análisis de fuerzas actuantes y resistentes, cada uno corresponde a un tipo de falla que posiblemente afectaría al espigón. Apoyándose en la teoría recogida de la guía de diseño *Large Woody Material -Risk Based Design Guidelines* elaborada por Knutson y Fealko en el año 2013; a continuación, se explica el procedimiento de cálculo de cada factor de seguridad que finalmente resultó en el diseño final de los espigones:

2.4.1. Balance de Fuerzas Verticales (Flotabilidad)

En la flotabilidad de la estructura intervienen cinco fuerzas; La resultante entre el empuje de la estructura y su peso, la fuerza de sustentación, el peso del lastre, peso del relleno del empotramiento y resistencia por fuste o fricción de piel del pilote. En la configuración del diseño habrá madera que esté por encima del nivel del agua y otra que está sumergida por lo tanto se debe tener cuidado en este aspecto.

a) Cálculo de la resultante entre el empuje de la estructura y su peso:

La ecuación N°1 representa la resultante entre el peso y el empuje que sufre la madera sumergida, la ecuación N°2 es el peso del material que está por encima del nivel de agua del diseño y que se encuentra en estado seco y no está sujeto al empuje.

$$F_{LWMs} = V_{LWMs} * (\gamma_{wood} - \gamma_w) \quad \dots (1)$$

$$F_{LWMd} = V_{LWMd} * \gamma_{wood} \quad \dots (2)$$

F_{LWMs} = Fuerza Resultante de la madera Sumergida

V_{LWMs} = Volumen de la Madera Sumergida

γ_{wood} = Peso Específico de la Madera

γ_w = Peso Específico del Agua

F_{LWMd} = Peso de la Madera Seca

V_{LWMd} = Volumen de la Madera Seca

b) Cálculo de la Fuerza de Sustentación (lift):

La fuerza de sustentación es generada por la aceleración del flujo sobre y debajo del objeto sólido, la cual crea una fuerza vertical ascendente. La fuerza de sustentación es una función del área de la madera y velocidad alcanzada. Comúnmente, el coeficiente lift es pequeño y varía desde 0.1 a 0.2 (0.18 para cilindros con un máximo aproximado de 0.45). Shields señala que en ausencia de mejor información para una estructura compleja el coeficiente lift “ Cl ” puede asumirse igual a 1 y para estructuras que no están completamente sumergidas podría ser 0.

$$F_L = - \frac{C_L * A_{LWM} * \gamma_w * U_0^2}{2 * g} \quad \dots (3)$$

C_L = coeficiente lift

A_{LWM} = Área de la madera perpendicular al flujo

U_0 = Velocidad del flujo aguas arriba en el evento de diseño

g = Aceleración debido a la gravedad

c) **Peso del Lastre:**

Como es conocido las estructuras de madera tienden a flotar por lo tanto es necesario agregar un peso extra llamado lastre, este tipo de lastre por lo general son piedras de gran tamaño y según el diseño pueden encontrarse sumergidas, no sumergidas o ambas.

$$F_{boulder} = F_{bouldersub} + F_{boulderdry} \quad \dots (4)$$

$$F_{bouldersub} = N_{bouldersub} * \frac{\pi}{6} * d_{bouldersub}^3 * (\gamma_{boulder} - \gamma_w) \quad \dots (5)$$

$N_{bouldersub}$ = Número de Rocas Sumergidas

$d_{bouldersub}$ = Diámetro Efectivo de la Rocas Sumergidas

$\gamma_{boulder}$ = Peso Específico de las rocas

$$F_{boulderdry} = N_{boulderdry} * \frac{\pi}{6} * d_{boulderdry}^3 * (\gamma_{boulder}) \quad \dots (6)$$

$N_{boulderdry}$ = Número de rocas no sumergidas

$d_{boulderdry}$ = Diámetro efectivo de las rocas no sumergidas

El peso unitario de rocas es típicamente estimado basado en la gravedad específica de 2.65. La gravedad específica puede entonces ser utilizada para estimar el peso unitario de las rocas individuales.

d) **Relleno del Empotramiento:**

Estructuras hechas de madera son a menudo empotradas en bancos o al sustrato para obtener adicional resistencia estructural a fuerzas laterales y verticales. Relleno de suelo es incorporado, entre los leños y el lastre, usando montacargas para asegurar su adecuada compactación. Las ecuaciones presentadas asumen que el nivel del material de relleno sumergido esta al mismo nivel del tirante del agua. Esta suposición se basa en que los bancos de los ríos del oeste de Estados Unidos son de material de grava y cantos rodados y tienen poca capacidad de ascensión capilar (Knutson y Fealko, 2013).

Los pesos específicos del suelo pueden ser revisados en la tabla de Pesos Específicos que está en el Anexo 1; o se puede usar la ecuación N°10.

La fuerza de resistencia asociada con el relleno de suelo de una estructura de madera puede ser estimada con la ecuación 8. El volumen de relleno que está por encima del tronco es igual a la altura por encima del tronco multiplicado por la longitud de empotramiento del tronco y también por el diámetro. Este volumen está generalmente separado en dos, uno que está sumergido y el otro seco.

$$F_{soil} = \sum_i^n V_{soilsub\ i} * \gamma'_{soil} + V_{soildry\ i} * \gamma_{soil} \quad \dots (7)$$

$$V_{soilsub\ i} = L_{eb\ i} * d_{bole\ i} * h_{soilsub\ i} \quad \dots (8)$$

$V_{soilsub\ i}$ = Volumen del suelo Sumergido por encima del tronco "i"

$L_{eb\ i}$ = Longitud de empotramiento del tronco "i"

$d_{bole\ i}$ = Diámetro del tronco "i"

$h_{soilsub\ i}$ = Altura del suelo sumergido por encima del tronco

$$V_{soildry\ i} = L_{eb\ i} * d_{bole\ i} * h_{soildry\ i} \quad \dots (9)$$

$V_{soildry\ i}$ = Volumen de suelo seco por encima del tronco

$h_{soildry\ i}$ = Altura del suelo seco por encima del tronco

$$\gamma_{soil} = (99.2 + 18.6 * \log(d_{50})) \quad \dots (10)$$

d_{50} = Tamaño del grano mediano

$$\gamma'_{soil} = \gamma_{sat} - \gamma_W \quad \dots (11)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(SG_{rock} + e) * \gamma_W}{1 + e} \quad \dots (12)$$

$$e = \frac{SG_{rock} * \gamma_W}{\gamma_{soil}} - 1 \quad \dots (13)$$

e) Resistencia del fuste o fricción de piel de los Pilotes:

Como el lastre, los pilotes sirven para aumentar la estabilidad vertical de la estructura. Los pilotes se mantienen anclados al lecho del río mediante la fricción de piel o fuste; por lo tanto, adicionar esta resistencia a la totalidad de la estructura ayudaría a lograr dicha estabilidad. La fricción de piel para un grupo de pilotes puede ser estimada con las siguientes ecuaciones.

$$F_{piles-v} = N_{piles} * \pi * d_{piles} * L_{piles} \left(K_s * \tan \frac{2}{3} \phi * \sigma' + \frac{d_{piles}}{4} * (\gamma_{wood} - \gamma_w) \right) \dots (14)$$

N_{piles} = Número de pilotes

d_{piles} = Diámetro de pilotes

L_{piles} = Longitud de pilotes

K_s = Coeficiente de presión de tierra Lateral

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo

$$\sigma' = L_{piles} * (\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad \dots (15)$$

El ángulo de fricción interna puede ser estimado usando la tabla del anexo 1 o utilizando la Figura 2.21. Las fuerzas de fricción de piel estimada se basan en la suposición que los pilotes son conducidos o vibrados dentro del lugar. Si los pilotes son perforados o excavados, el coeficiente asociado con las presiones laterales deberá ser aproximadamente 50 a 25 por ciento del valor del conducido, respectivamente (Knutson y Fealko, 2013).

f) Cálculo de la resultante de las fuerzas verticales:

Finalmente, la resultante de las fuerzas verticales sería la suma de todas las fuerzas calculadas anteriormente. Si la fuerza resultante es negativa, nos indicaría que la estructura es estable ante la fuerza de flotación.

$$F_b = F_{LWMS} + F_{LWMD} + F_L + F_{boulder} + F_{soil} + F_{piles-v} \quad \dots (16)$$

g) Cálculo del Factor de Seguridad

Es la suma de todas las fuerzas positivas divididas por el valor absoluto de la suma de todas las fuerzas negativas como se aprecia en la Ecuación 17. Se compara el resultado FOS_b con los coeficientes dados en la tabla 2.6, de acuerdo al riesgo asumido durante el diseño y el periodo de diseño. Si el valor calculado es menor que el coeficiente dado en la tabla anterior deberíamos plantearnos agregar lastre o adicionar pilotes.

$$FOS_b = \frac{F_{LWMD} + F_{boulders} + F_{soil} + F_{piles-v}}{|F_{LWMS} + F_L|} \quad \dots (17)$$

FOS_b = Factor de Seguridad de Flotabilidad

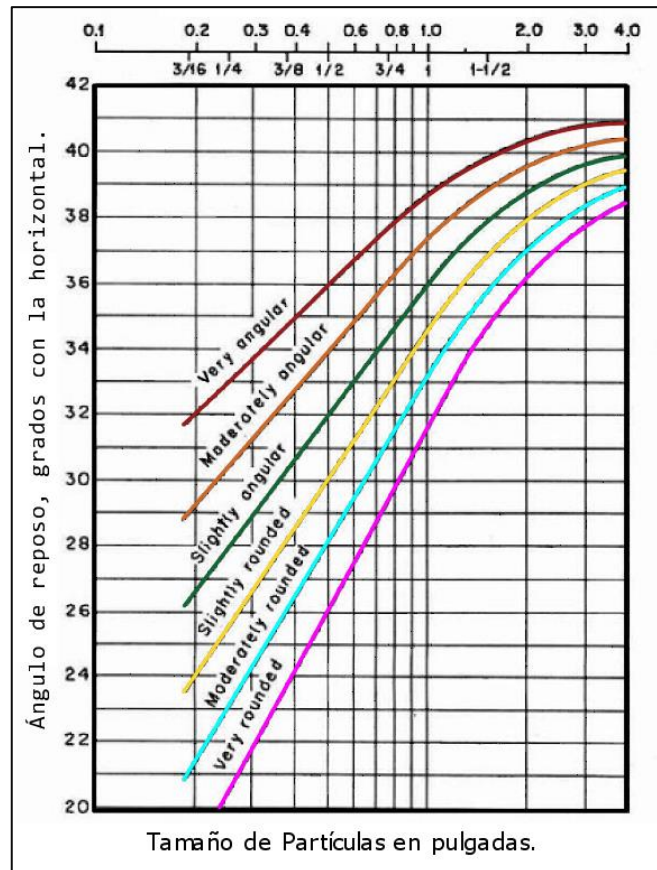


Figura 2.21. Ángulo de Fricción Interna para materiales no cohesivos.
Modificado de: U.S. Bureau Reclamation, 1952.

2.4.2. Balance de Fuerzas Horizontales (Deslizamiento)

Las estructuras de madera son sometidas a fuerzas horizontales que pueden lograr que la estructura se deslice hacia aguas abajo. Las fuerzas que desestabilizan a la estructura en esta dirección son la fuerza de arrastre y la presión hidrostática que se genera del lado aguas arriba de la estructura. Para que la estructura permanezca estable la suma de las fuerzas hidrostáticas aguas debajo de la estructura, la fricción entre el suelo y la estructura, las fuerzas pasivas del suelo que se genera en los troncos empotrados y la resistencia lateral de los pilotes; deben ser mayores a las anteriores.

a. Fuerza de Arrastre

La fuerza de arrastre actúa sobre los troncos y depende de la velocidad del flujo y del área donde actúa. Las fuerzas de arrastre pueden aumentar con la retención de escombros así que se debe tomar con criterio el área con la cual se irá a calcular.

$$F_d = \frac{C_D * A_{LWM} * \gamma_W * U_c^2}{2 * g} \quad \dots (18)$$

F_d = Fuerza de Arrastre

C_D = Coeficiente de arrastre

A_{LWM} = Área sumergida aguas arriba de la estructura

γ_W = Peso específico del agua

U_c = Velocidad en la sección contraída

g = aceleración de la gravedad

Para la elección del coeficiente de arrastre Knutson y Fealko recomiendan usar las fórmulas de Parola (2000):

$$B = \frac{A_b}{A_b + A_c} \quad \dots (19)$$

B = Tasa de obstrucción

A_b = Área Bloqueada por la estructura

A_c = Área de la sección contraída del río

$$Fr_c = \frac{V_c}{\sqrt{g * Y_c}} \quad \dots (20)$$

Fr_c = Número de Froude del flujo contraído

V_c = Velocidad del flujo contraído

Y_c = Profundidad promedio del flujo contraído

Tabla 2.7. Coeficiente de Arrastre relacionados con la tasa de obstrucción y número de Froude.

Fuente: Large Woody Material -Risk Based Design Guidelines, knutson y Fealko, 2013.

Cd =	SI
1.8	$B < 0.36$ y $Fr_c < 0.4$
$2.6 - 2.0 * Fr_c$	$B < 0.36$ y $0.4 < Fr_c < 0.8$
1.0	$B < 0.36$ y $Fr_c > 0.8$
$3.1 - 3.6 * B$	$0.36 < B < 0.77$ y $Fr_c < 1.0$
$1.4 - 1.4 * B$	$B > 0.77$ y $Fr_c < 1.0$

b. Fuerzas Hidrostáticas

Las estructuras de maderas que se usan como protección de ríos al estar sumergidos son afectadas por la presión hidrostática. En ríos con anchos pequeños puede ocurrir que el flujo vaya de flujo subcrítico, a través del crítico, a flujo supercrítico y volver al flujo subcrítico a través de un salto hidráulico. Cuando esta formación de salto hidráulico se produce, la diferencia de fuerzas hidrostáticas aguas arriba y aguas abajo pueden llegar a ser significativas y potencialmente arriesgar la estabilidad de estas (Knutson y Fealko, 2013).

$$F_{hu} = \frac{1}{2} * \gamma_w * Y_u * A_u \quad \dots (21)$$

F_{hu} = Fuerza hidrostática del lado aguas arriba de la estructura

Y_u = Tirante del lado aguas arriba de la estructura

A_u = Área proyectada normal a la dirección del flujo en el lado aguas arriba

$$F_{hd} = - \frac{1}{2} * \gamma_w * Y_d * A_d \quad \dots (22)$$

F_{hd} = Fuerza hidrostática del lado aguas abajo de la estructura

Y_d = Tirante del lado aguas abajo de la estructura

A_d = Área proyectada normal a la dirección del flujo en el lado aguas abajo

c. Fuerzas de Impacto

Estas fuerzas son producidas por el impacto de los troncos que trae la corriente, la ecuación 23 ha sido definida por ASCE en el 2006 según indica Knutson y Fealko. En esta ecuación se debe asumir que la velocidad de los troncos a impactar es la misma que la de la superficie del río y llega a ser cero en el instante que impacta a la estructura. Los coeficientes de importancia, orientación, profundidad y bloqueo deben ser tomados de la tabla de valores de coeficiente de importancia (ver anexo 4) y figuras 2.22 y 2.23.

$$F_i = \frac{\pi * W_{debris} * V_{channel} * C_i * C_o * C_d * C_b * R_{max}}{2 * g * \Delta t} \quad \dots (23)$$

F_i = Fuerza de Impacto

W_{debris} = Peso de escombros

g = Aceleración debido a la gravedad

$V_{channel}$ = Velocidad del agua

Δt = Variación de tiempo que toma la velocidad inicial en llegar a cero

C_i = Coeficiente de Importancia

C_i = Coeficiente de orientación = 0.8

C_d = Coeficiente de de profundidad

C_b = Coeficiente de bloqueo

R_{max} = Promedio de respuesta para cargas de impulso = 0.8

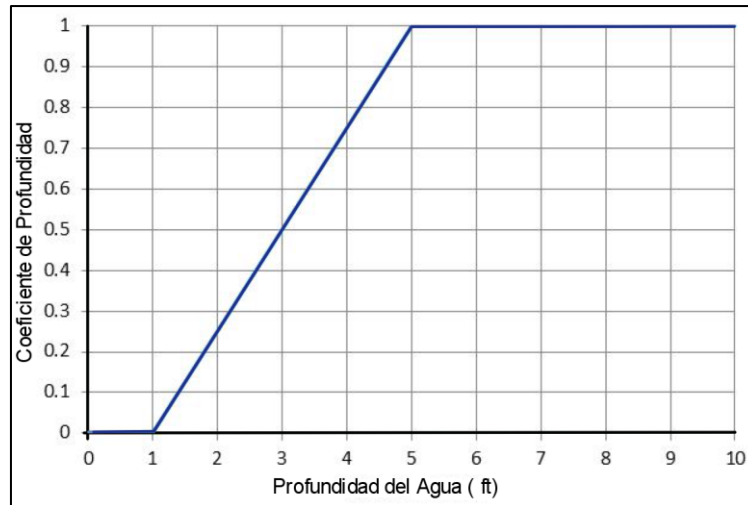


Figura 2.22. Coeficiente de Profundidad.

Modificado de: Large Woody Material -Risk Based Design Guidelines, Knutson y Fealko, 2013.

El intervalo de tiempo en que los troncos impactan es difícil de estimar, pero en recientes estudios según de la FEMA 2009 se determinó que estos suceden en un intervalo de 0.01 a 0.05. De acuerdo con ASCE 7-05 en el diseño de cargas mínimas para edificios y otras estructuras (2006), la recomendación es un intervalo de impacto de 0.03 segundos. Se recomienda al diseñador que considere las cargas de impacto si hay una alta probabilidad de que sucedan. El diámetro promedio del leño debe ser estimado basándose en potenciales recursos de madera dentro de una milla (1.60 km) aguas arriba del lugar de la estructura. Debe asumirse que las fuerzas de impacto actúan en la elevación de superficie del agua y en una dirección horizontal. (Knutson y Fealko, 2013).

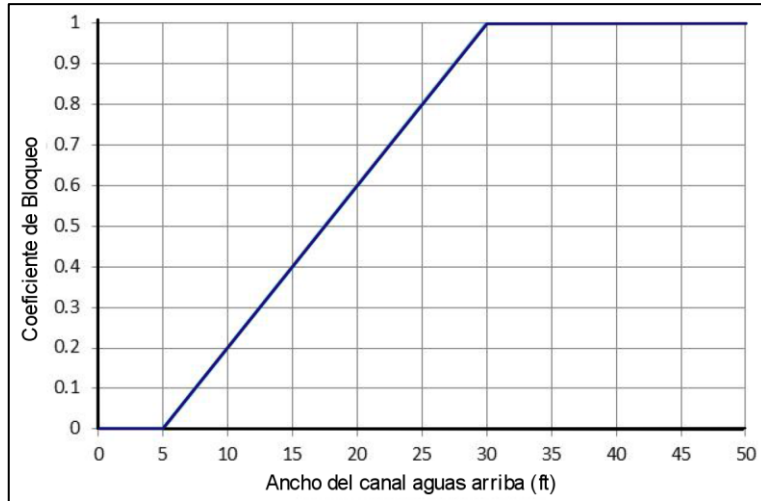


Figura 2.23. Coeficiente de Bloqueo.

Modificado de: Large Woody Material -Risk Based Design Guidelines, Knutson y Fealko, 2013.

Cabe mencionar, que en la Amazonía peruana podemos encontrar ríos con anchos de casi 300 metros y profundidades superiores a los 20 m como es el caso del Río Madre de Dios; el diseñador debe tener cuidado al momento de usar las tablas y gráficos anteriormente mencionados los cuales han sido aplicados para Ríos de Estados Unidos.

d. Fuerza de Fricción:

La fuerza de fricción se produce entre el lecho del río y la estructura, esta se calcula multiplicando la fuerza vertical calculada en el análisis de flotabilidad (ecuación 16) por el coeficiente de rozamiento. Para el cálculo del coeficiente de rozamiento se puede asumir como la tangente del ángulo de fricción interna (anexo 1 y Figura 2.21).

$$F_f = -\mu_{bed} * (F_b - F_{piles-v}) \quad \dots (24)$$

$$F_f = \text{Fuerza de fricción}$$

$$\text{Para que exista esa resitencia: } (F_b - F_{piles-v}) > 0$$

$$\mu_{bed} = \tan \phi \quad \dots (25)$$

e. Fuerzas pasivas:

Las fuerzas pasivas actúan en contra de las fuerzas de arrastre cuando hay material sólido detrás de la estructura. En el cálculo de estas fuerzas se asume, que el banco y el material de relleno se componen de suelo isotrópicos homogéneos, la fricción entre el suelo y el tronco es ignorada, los suelos son típicamente granulares y no cohesivos, y que la elevación de la napa freática esta al mismo nivel que el tirante del río.

Las siguientes ecuaciones representan el caso donde las fuerzas pasivas actúan a lo largo de la longitud de un leño perpendicular al flujo.

$$F_{passive} = -0.5 * K_p * \sum_i^n \sigma_{vi} * L_{em_i} * d_{log_i} \quad \dots (26)$$

$$K_p = \frac{1 + \tan \phi}{1 - \tan \phi} \quad \dots (27)$$

$$\sigma_{vi} = D_{sub_i} * (\gamma_{sat} - \gamma_{water}) + D_{dry_i} * \gamma_{soil} \quad \dots (28)$$

$$D_{sub_i} = \text{Altura del suelo sumergido por encima del tronco } i$$

$$D_{dry_i} = \text{Altura del suelo seco por encima del tronco } i$$

L_{em_i} = Longitud empotrada del tronco i

d_{log_i} = diametro del tronco i

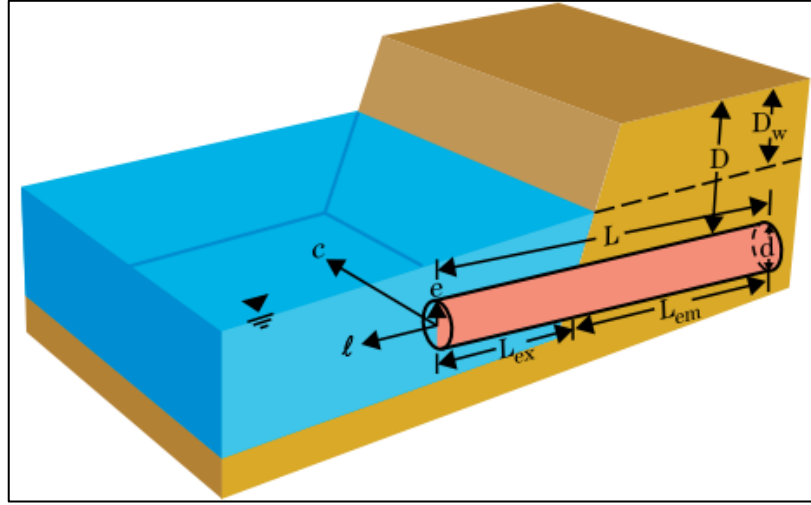


Figura 2.24. Esquema de definición para fuerzas Geotécnicas sobre un Madero Enterrado.
Fuente: Suplemento Técnico 14J: “Use of Large Woody Material for Habitat and Bank Protection”, 2007.

f. Resistencia lateral de los pilotes:

Resistencia lateral de pilotes en una estructura de madera se ha basado comúnmente en trabajos desarrollados para el diseño de señales de tráfico susceptibles a cargas de viento. La metodología más común, para suelos típicamente no cohesivos del lecho de un río, es la ecuación de Brom.

$$F_{piles-h} = -N_{piles} * \frac{L_{pile}^3 * \frac{1}{2} * \gamma_e * d_{pile} * K_p}{h_{load} + L_{pile}} \quad \dots (29)$$

N_{piles} = Número de pilotes

L_{piles} = Longitud de empotramiento del pilote

$$\gamma_e = \gamma_s - \gamma_w \quad \dots (30)$$

γ_e = Peso específico efectivo del suelo

γ_s = Peso específico seco del suelo

γ_w = Peso específico del agua

d_{pile} = Diámetro del pilote

h_{load} = Altura por encima de la potencial profundidad de socavación

$$K_p = \frac{1 + \text{Sen } \phi}{1 - \text{Sen } \phi} \quad \dots (31)$$

Un análisis conservador sugiere determinar la fuerza de resistencia lateral del pilote requerida asumiendo un valor mínimo del factor de seguridad de deslizamiento (FOS sliding). Entonces una profundidad mínima de empotramiento requerida para lograr la estabilidad deseada, puede ser estimada para un dado número específico de pilotes (N_{piles}). Este análisis requiere un proceso iterativo y asume que la fuerza resultante está a la mitad del tirante del flujo del lado aguas arriba de la estructura.

$$|F_{piles-h}| = FOS_{sliding-min} * (F_d + F_{hu} + F_i) + |F_{hd} + F_f + F_{passive}| \quad \dots (32)$$

$FOS_{sliding-min}$ = *Mínimo factor de seguridad permitido para deslizamiento*

$$L_{pile}^3 = \frac{|F_{piles-h}| * (h_{load} + L_{pile})}{N_{piles} * \gamma_e * d_{pile} * \frac{K_p}{2}} \quad \dots (33)$$

Es importante analizar las fuerzas a las que estará sometido un pilote (cortante y momento), para asegurar que el pilote no se romperá ni se cortara durante el evento de diseño. Este a menudo es un factor limitante para los pilotes y puede ocasionar que requiramos más pilotes de los que originalmente estimamos en las ecuaciones anteriores. (Knutson y Fealko, 2013).

g. Factor de Seguridad de Deslizamiento

El factor de seguridad es calculado por la división entre fuerzas resistentes (presión hidrostática aguas abajo, fuerza de fricción, resistencia lateral de pilotes y fuerzas pasivas) y las fuerzas desestabilizadoras (fuerzas de arrastre, fuerzas hidrostáticas aguas arriba y fuerzas de impacto).

$$FOS_{sliding} = \frac{|F_{hd} + F_f + F_{piles-h} + F_{passive}|}{F_d + F_{hu} + F_i} \quad \dots (34)$$

Si el factor de deslizamiento es menor que el recomendado entonces se debe agregar más, lastre, pilotes o si es absolutamente necesario algún tipo de anclaje mecánico.

2.4.3. Balance de Fuerzas que Generan Rotación

La rotación de una estructura puede ocurrir cuando hay cargas asimétricas. Para estimar la estabilidad de una estructura relacionado a la rotación es necesario calcular los momentos asociados con cada fuerza. Para asegurar la estabilidad, la suma de los momentos desestabilizadores (MD rotation) debe ser menor que la suma de los momentos reaccionantes (MR rotation). El cálculo del balance de fuerzas que generan rotación está sujeto al criterio del diseñador, las estructuras de madera que no estén ubicadas en dirección perpendicular al flujo tienden a ser cargadas de una manera muy uniforme y la rotación no es un factor importante.

$$MD_{rotation} = (F_i + F_d + F_{hu}) * \left(\frac{L_{sp} + L_{ebp}}{2} \right) \quad \dots (35)$$

L_{sp} = Longitud desde la punta de la estructura de madera hasta el punto

de rotación medido perpendicular al flujo

L_{ebp}
= Longitud de empotramiento de la estructura de madera perpendicular al flujo

$$MR_{rotation} = \left| F_{hd} * \left(\frac{L_{sp} + L_{ebp}}{2} \right) + F_{passive} * \frac{L_{ebp}}{2} + F_f * \frac{L_{sp}}{2} + \sum_i^n F_{pile-h_i} * L_{ph_i} \right| \quad \dots (36)$$

$$F_{pile-h_i} = \frac{F_{piles-h}}{N_{piles}} \quad \dots (37)$$

L_{ph_i}
= Distancia desde el pilote i al punto de rotación medido perpendicular al flujo

Finalmente, para verificar su estabilidad se debe comparar el factor recomendado con el calculado, para hallar el último se usa la siguiente ecuación:

$$FOS_{rotation} = \frac{MR_{rotation}}{MD_{rotation}} \quad \dots (38)$$

2.4.4. Balance de Fuerzas que Generan Vuelco

El giro o vuelco puede ocurrir en estructuras que además de interactuar con grandes caudales son esbeltas, es decir, tienen anchos pequeños, gran longitud y altura. Los momentos de giro son calculados de similar forma que los momentos de rotación. La necesidad de hacer este análisis se deja a juicio del profesional responsable encargado de completar la parte del diseño.

$$MD_{overturn} = F_i * (Y_u + d_{bury}) + F_d * \left(\frac{Y_u}{2} + d_{bury}\right) + F_{hu} * \left(\frac{Y_u}{3} + du_{bury}\right) + |F_L| * L_s \quad \dots (39)$$

du_{bury}
= Profundidad en el lado aguas arriba de la estructura desde el fondo del canal
al punto de rotacion medido perpendicular al flujo.

L_s = Longitud de la estructura medida paralela al flujo

$$MR_{overturn} = |F_{hd}| * \left(\frac{Y_d}{2} + dd_{bury}\right) + |F_{passive}| * (dd_{bury}) + (F_b - F_L - F_{piles-v}) * \frac{L_s}{2} + \sum_i^n F_{pile-v_i} * L_{pv_i} \quad \dots (40)$$

$$F_{pile-v_i} = \frac{F_{piles-v}}{N_{piles}} \quad \dots (41)$$

L_{pv_i} = Distancia desde el Pilote "i" al punto de rotación medido paralelo al flujo

Para calcular el factor de Vuelco, para luego ser comparado, se tiene la siguiente ecuación.

$$FOS_{overturn} = \frac{MR_{overturn}}{MD_{overturn}} \quad \dots (42)$$

III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Enfoque de la Investigación:

El enfoque de esta investigación “Diseño de Espigones Fabricados con Troncos de Árboles”, fue elaborado bajo el planeamiento metodológico del enfoque cuantitativo. La investigación siguió un proceso secuencial y estructurado para corroborar una hipótesis que fue planteada antes de recolectar y analizar los datos. Así mismo, esta investigación es totalmente objetiva utilizando la lógica o pensamiento deductivo y evita la subjetividad y tendencias del investigador.

El enfoque Cualitativo Utiliza la recolección y análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecida previamente, y confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población. (Hernández, Fernández y Baptista, 2003, p.12).

3.1.2. Diseño

El proceso de diseño de espigones, es un proceso iterativo que requiere el perfeccionamiento de un diseño preliminar (configuración de diseño o esquema) a partir de la evaluación de los resultados de pruebas en modelos físicos o numéricos. En ambos casos se utiliza un procedimiento experimental bajo condiciones controladas de simulación de un prototipo en un modelo hidráulico. Desde esta perspectiva la investigación es de carácter experimental y se basa en principios del método científico. Utilizando variables físicas y cuantificables, englobadas en distintas configuraciones de diseño.

En una tesis experimental se reproduce un fenómeno dentro de un ambiente en específico de pruebas y se va modificando diferentes elementos para observar que sucede con el fenómeno. Desde luego todo esto se realiza mediante un método formal de investigación con manipulación de variables experimentales y condiciones rigurosamente controladas para simular las posibles condiciones a las que se enfrentara el objeto en estudio. (Muñoz, 2011, p. 23)

3.1.3. Nivel

De acuerdo al nivel de profundidad del estudio, esta investigación abarcó fines exploratorios en su inicio, y terminó siendo descriptiva, correlacional y hasta explicativa; a causa de los objetivos de la misma. Inició de forma exploratoria con el fin de familiarizarnos con una tecnología foránea relativamente desconocida en nuestro país. Después fue necesario describir el marco teórico y la metodología de diseño de espigones de modo que se determine el tipo de variables que intervienen en cada configuración o esquema de diseño emplazado en el cauce del río. Estas mismas variables fueron correlacionadas con el fin de conocer la asociación que existe entre espigones y los cambios morfológicos e hidrodinámicos que producen sobre el cauce del río. Finalmente, luego de la experimentación de las mencionadas configuraciones de diseño y en base a los resultados y el análisis, se explicaría las causas que conllevan a que determinada configuración de diseño se comporte eficientemente.

3.1.4. Sujetos de la Investigación

La investigación tiene como población los ríos de la selva peruana que sufren de fenómenos de erosión lateral de orillas, y cuya solución requeriría de espigones. Estas zonas de la selva peruana carecen de recursos de materiales tradicionales como roca o concreto para fabricar dichos espigones. Además, los ríos de la selva peruana poseen características hidrodinámicas y morfológicas propias de ríos amazónicos. Se utilizó una muestra representativa no probabilística, es decir, la elección de la muestra dependió de causas relacionadas con las características de la investigación y el criterio del investigador más no de la estadística. La muestra fue el tramo del río madre de Dios denominado “La Pastora” que es adyacente a la ciudad de puerto Maldonado. La problemática en este tramo estuvo relacionada con la erosión de su banco derecho que ha afectado a infraestructura pública y privada como lo son; casas y a la carretera interoceánica Perú - Brasil.

3.1.5. Tipo

Podemos agregar que esta investigación es del tipo aplicada, se orienta a resolver un problema en concreto en base a la utilización de conocimientos de forma práctica; con resultados que aportan al sector social. Se utilizó un marco teórico sobre los espigones fabricados con troncos de árboles para generar una configuración de diseño que resuelva la problemática de erosión lateral en la zona la Pastora del Río Madre de Dios. Se validaría este diseño en experimentaciones para finalmente explicar el proceso. A partir de este punto, esta experiencia formaría parte del estado del arte de diseño de espigones en el Perú aumentando el desarrollo cultural y científico en el Perú.

3.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LOS ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ÁRBOLES

El proceso de diseño de espigones fabricados con troncos de árboles es similar al utilizado para estructuras tradicionales. Es un proceso iterativo que requiere el refinamiento de un diseño preliminar hasta lograr alcanzar la meta del proyecto.

En un principio, para abordar el diseño de los espigones de madera, es crítico evaluar el sitio y comprender aspectos históricos y actuales de la morfología, hidrología, hidráulica, suelos, ecología y contexto humano del proyecto. Comprender la dinámica del cauce y los eventos del flujo en el tiempo, son esenciales para documentar las condiciones y riesgo preexistente en el sitio del proyecto sino se construyeran los Espigones. Todo esto sirve para claramente definir las metas del proyecto y restricciones, que influirán en el diseño de la estructura.

El resultado de esta evaluación es útil para plantear el diseño conceptual de los espigones y un esquema preliminar de los mismos sobre el cauce. Este esquema preliminar necesita ser puesto a prueba bajo un análisis hidrodinámico y morfológico. Para lograrlo es necesario hacer un modelamiento hidráulico que permita evaluar el régimen de flujo y cambios morfológicos, bajo condiciones actuales y bajo potenciales escenarios post construcción.

El Modelamiento hidráulico (físico o numérico) es un proceso iterativo que permite cambios en el número y localización de espigones. Los diseños son modificados para lograr las metas del proyecto y para minimizar el riesgo asociado con los diseños. Una vez hallado el diseño que se ajusta mejor a las metas del proyecto, se ajusta también los cálculos de estabilidad estructural de cada espigón y se presenta un diseño final.

Esta investigación tiene como objetivo diseñar los espigones fabricados con troncos de árboles en el Río Madre de Dios (en el tramo del cauce conocido como la Pastora) y explicar su proceso. El procedimiento de diseño que se realiza en esta tesis tiene un enfoque experimental, pero emplea los datos de una situación real. Desde esta perspectiva los pasos necesarios para el diseño y los resultados que se obtengan replican lo sucedido sobre una situación real. En este capítulo se mencionará todo el procedimiento que se requiere para obtener un primer diseño. Este primer diseño o alternativa de diseño consta de un conjunto de arquitecturas individuales de espigones de madera que han sido dispuestas sobre el cauce del río. Su descripción geométrica y la evaluación de su desempeño (utilizando un modelo hidráulico físico) se hará en el capítulo de análisis de resultados y sobre esta evaluación se realizará su refinamiento. El modelo físico tiene una escala de 1/60 y sobre él se realizaron ensayos para las condiciones actuales (sin espigones) y bajo escenarios post construcción. La optimización o refinamiento se hará hasta una tercera alternativa debido a asuntos presupuestales de este proyecto relacionados con la ejecución de los ensayos experimentales.

Cabe decir que los datos utilizados para esta investigación tienen su origen en los estudios que realizó la empresa Odebrecht en el año 2011. Estos estudios fueron necesarios para crear una alternativa de diseño de espigones que mitigara los efectos de erosión sobre la margen derecha del Río Madre de Dios en las cercanías del puerto La Pastora en la ciudad de Puerto Maldonado. La alternativa de solución fue estudiada en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica en un modelo físico a escala 1/60. La problemática, los estudios preliminares y el modelo físico son utilizados en la elaboración de esta investigación; pero con el enfoque de utilizar espigones de madera.

Este título consta de cinco subtítulos. En los primeros dos subtítulos; se evalúa la condición actual e histórica del río. Para hacerlo se utilizó los resultados del análisis de la problemática del Río Madre de Dios mediante imágenes satelitales y los datos de los estudios básicos realizados por Odebrecht.

En los dos siguientes subtítulos se concibe una arquitectura de diseño de los espigones de madera que adapta la tecnología foránea de la premiada Ingeniería de Atascos de troncos(ELJ). A partir de esta arquitectura y utilizando los criterios de diseño nombrados en el capítulo anterior, se crea el diseño de 12 espigones que se ubicarán geométricamente sobre el cauce para crear, lo que llamaremos en esta tesis como, una alternativa de diseño. Esta alternativa de diseño será sujeta a pruebas en modelo físico para su refinamiento u optimización. Para finalizar, en el subtítulo 5 se ejemplifica el diseño de una sola arquitectura de espigón de madera. Se utilizan los datos de velocidades, tirantes y geometría de los estudios básicos para calcular su estabilidad estructural sobre el cauce del río.

Cabe mencionar, que el proceso de modelamiento físico es descrito en el tercer título y el procedimiento de ensayo en el título cuatro. Las características geométricas de la primera alternativa de diseño y las posteriores, que resultan de refinarla, son explicadas en el capítulo 4.

3.2.1. Estudio de la Problemática del Río Madre De Dios – Zona de La Pastora Usando Imágenes Satelitales

3.2.1.1. Descripción general del alcance del proyecto

El proyecto denominado La Pastora se encuentra ubicado en el departamento de Madre de Dios en la ciudad de puerto Maldonado. Durante estos años ha ocurrido un crecimiento poblacional alto generando establecimientos urbanos cerca de la margen derecha del río.

El río madre de Dios bordea la ciudad de puerto Maldonado como se observa en la figura 3.1. Muy probablemente debido a causas antropogénicas se ha generado problemas de erosión lateral acelerada sobre la margen derecha del río; como consecuencia ha producido el colapso de los acantilados. Esta situación ha afectado a viviendas y construcciones aledañas; y además ha puesto en alto riesgo la integridad del tramo 3 de la Carretera Interoceánica Sur ((km 480+070 – km 480+910) y con ello, la conectividad de las poblaciones de Madre de Dios con el resto del país.

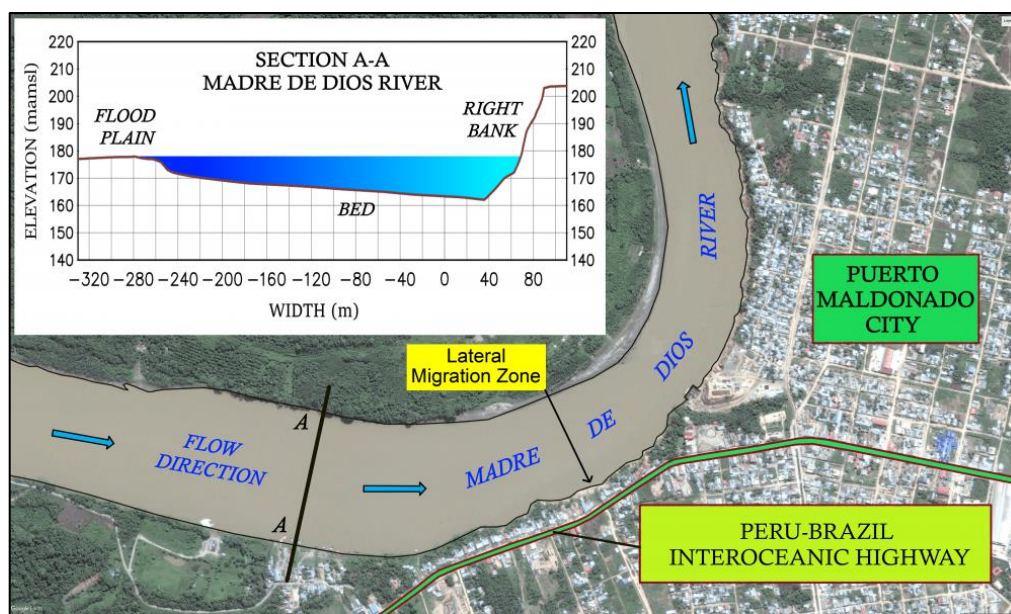


Figura 3.1. Ubicación de la Zona de estudio.
Modificado de: Google Earth Images, 2011.

El proyecto tiene un alcance de aproximadamente 5 km donde se instalarán los espigones a diseñar, en este alcance se han elaborado estudios para Odebrecht tales como: hidrología, hidráulica, suelos, topografía, batimetría e Impacto ambiental como se mencionará en la sección 3.2.

Para entender un poco más sobre la problemática del río, su morfología (descripción del meandro) y tener una visión clara del alcance del proyecto se puede recurrir al estudio mediante imágenes satelitales.

3.2.1.2. Metodología empleada para Estudiar el Meandro

A. Aspectos Generales

Desde el punto de vista de la hidráulica fluvial, todos los ríos están sujetos en mayor o menor grado a procesos de erosión o degradación, equilibrio y sedimentación o agradación. Un río se considera en estado de equilibrio cuando no varía el perfil de fondo de las márgenes del cauce y, por lo tanto, existe compensación entre los sedimentos que son transportados hacia al sitio y desde el sitio. Una importante variedad de problemas de ingeniería hidráulica requiere de una descripción apropiada de estos procesos morfológicos. (Domínguez, Farías y Reuter, 2011).

Poder comprender la forma que caracteriza a un río, así como la tendencia natural de sus desplazamientos naturales, nos permite conceptualizar el problema asociado a riesgos de daños de propiedad e infraestructura que se localizan a lo largo del curso del río. Además, este tipo de análisis amplía la visión del ingeniero encargado del diseño de estructuras de obras de protección de Río. Desde este punto de vista, sugerir un diseño que irrumpa de forma dramática las tendencias naturales, implicaría riesgos importantes sobre el río y sobre la estructura misma.

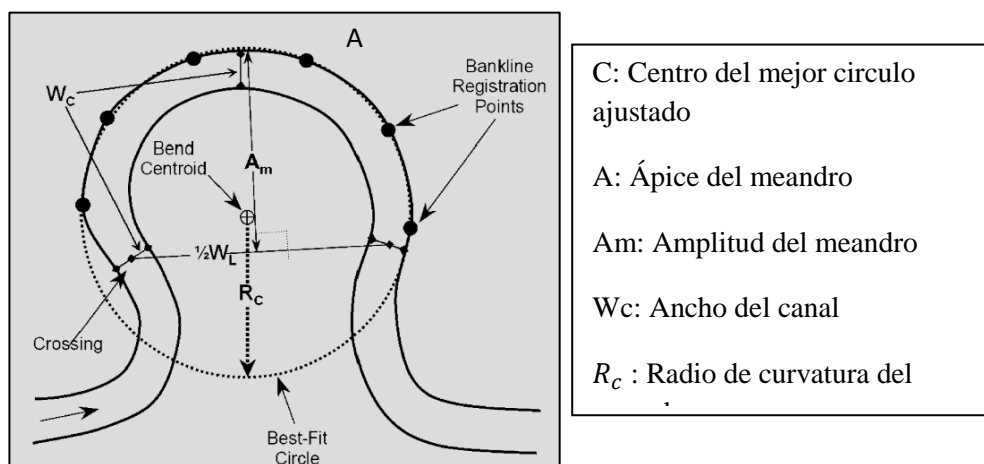


Figura 3.2. Características Morfológicas de un Meandro.

Fuente: Characterization and prediction of meandering channel migration in the GIS environment: A case study of the Sabine River in the USA, Heo, J., Duc, T.A., Cho, H., y Choi, S, 2009.

La geometría del meandro y de la sección del río afecta al esfuerzo cortante hidráulico generado en la interfaz entre el agua y el suelo (Briaud, Chen, Young, 2001). Para describir las características morfológicas de los meandros se pueden usar diferentes parámetros como los mostrados en la figura 3.2 tomada de la publicación Caracterización y Predicción De La Migración de un meandro en el Ambiente Gis.

Existen numerosas investigaciones enfocadas en el estudio de desplazamientos de los meandros (tasa de migración) con diferentes metodologías; las cuales que pueden ser divididos en tres categorías (Briaud, Chen, Young, 2001):

- Aquellos que usan mapas de secuencia- tiempo y extrapolación:

Se predice por acumulación de mapas, fotografías aéreas e imágenes satelitales; de varias fechas en el pasado. Midiendo la tasa de migración de estos mapas y extrapolando para el futuro. Estas imágenes pueden obtenerse desde librerías locales o desde sitios web. El inconveniente son la limitada disponibilidad de mapas y fotografías en el pasado y la suposición que condiciones de suelo y flujo serán las mismas que en el pasado. Departamento de transporte de estados unidos comúnmente usa este método.

- Aquellos que usan ecuaciones empíricas

Se basa en ecuaciones de correlación derivadas de datos de observación de migración de meandros. Las desventajas de este método es que es simple y se basa en datos de observación a full escala. Los inconvenientes es que no incluye todos los parámetros esenciales que influyen en el proceso y que la aplicabilidad de la ecuación es limitada a la extensión de la base de datos, ambos en términos de cantidad de datos y área geográfica.

- Aquellos que usan modelos fundamentales

El método fundamental consiste en de modelación de los procesos de erosión en la interfase de agua y suelo y, usando futuros hidrogramas, proyectándolo dentro del tiempo (velocidad del agua versus tiempo). Este método tiene la ventaja de simular los fenómenos reales de un sitio en específico. Tiene el inconveniente de ser más complicado porque requiere mediciones de las propiedades del suelo y la selección de futuros hidrogramas.

Dentro de los métodos anteriormente mencionados usaremos el de mapas de secuencia y extrapolación para predecir el movimiento del meandro. Este método tiene muchas ventajas como tiempo, costo, efectos a escala, y práctico rendimiento (Joon Heo ,Trinh Anh Duc, Hyung-Sik Cho y Sung-Uk Choi, 2008); además con los avances de los sistemas de información geográfica se puede recolectar información de todas las partes del mundo y con un alto grado de confiabilidad, lo cual resulta ser un recurso valioso para la investigación de geomorfologías de ríos.

B. Metodología utilizada para predecir la migración de meandros elaborado por: P. F. Lagasse, W.J. Spitz y L.W. Zevenbergen para la NCHRP de USA en el 2004.

Este método usa como fuente imágenes satelitales, mapas y fotografías aéreas para realizar un análisis en el tiempo de la migración del meandro del río estudiado. Las imágenes se sitúan en el periodo que han sido tomadas y se identifican y delimitan los parámetros que describen el meandro. Luego se hace el análisis de evolución del meandro y en base a estos datos se hace una predicción de una ubicación futura.

Paso 1: Obtener las imágenes y hacer un pre procesamiento

Para realizar la superposición de imágenes es necesario obtener imágenes satelitales, fotografías aéreas y mapas para el estudio. Los mapas y fotografías aéreas deben ser llevados a una escala común de trabajo para poder ser comparadas; puede usarse puntos de control para este objetivo. Si se usa GIS (Sistema de Información Geográfica) las imágenes deben haber pasado por un proceso de orto rectificación.

Paso 2: Trazo de las líneas de los bancos

Una vez establecida una escala común de trabajo se procede a identificar y delimitar los bancos del río. Ciertamente es poco probable encontrar curvas de meandro que sean perfectamente redondas con líneas de bancos refinadas. Muy a menudo se generan problemas en la identificación de las características del meandro debido a la presencia de vegetación, humedad, algún tipo de estructuras, etc. Cuando se usa algún sistema de información geográfica, para delimitar cuerpos de agua, el proceso se puede realizar por la combinación de bandas espectrales.

Paso 3 : Trazo de los radios de curvatura

Cada banco delineado que define un meandro puede ser representado por una serie de puntos. Mediante estimación de mínimos cuadrados se puede encontrar la localización del centro y el radio de un imaginario mejor círculo que se ajuste a este conjunto de datos. La ecuación de este círculo con centro con coordenadas (a, b) y radio de curvatura R es:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad \dots (1)$$

Siendo (x_i, y_i) , $i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, n$; sean un conjunto de datos de puntos en el plano x,y . Para determinar los valores de a,b y R que proporcionen una de las menores estimaciones cuadráticas de un círculo adecuado a los datos de los puntos, la siguiente ecuación fue reducida:

$$F(a, b, R) = \sum_{i=1}^N [(Xi - a)^2 + (Yi - b)^2 - R^2]^2 \dots (2)$$

Paso 4 : Predicción de la migración del canal:

Predecir la migración de un meandro puede hacerse con 2 ó 3 imágenes que registren la forma del río para cada tiempo en la que han sido tomadas. Si tenemos 3 imágenes tomadas para los tiempos t_1, t_2 y t_3 ; y en cada imagen se ha trazado su respectivo radio de curvatura (R_{c_1}, R_{c_2} y R_{c_3}); podemos estudiar la tendencia del movimiento del meandro durante este tiempo usando las siguientes ecuaciones:

$$\Delta R_{c_A} = \frac{(R_{c_2} - R_{c_1})}{Y_A} \dots (3)$$

$$\Delta R_{c_B} = \frac{(R_{c_3} - R_{c_2})}{Y_B} \dots (4)$$

ΔR_{c_A} = Tasa de cambio del radio de curvatura para el periodo entre t_1 y t_2 .

ΔR_{c_B} = Tasa de cambio del radio de curvatura para el periodo entre t_2 y t_3 .

Y_A = Número de años entre los tiempos t_1 y t_2

Y_B = Número de años entre los tiempos t_3 y t_2

Durante los intervalos de tiempo Y_A y Y_B los centros de los círculos que representan al meandro se han desplazado una distancia D_A y D_B , y hubo un cambio de dirección del desplazamiento (θ_A, θ_B).

Si nosotros quisieramos saber hasta donde habrá migrado un meandro en un tiempo t_4 :

$$R_{c_4} = R_{c_3} + \left[\frac{(R_{c_3} - R_{c_2})}{Y_B} * Y_C \right] \dots (5)$$

$$\theta_C = \left[\left(\frac{\theta_B - \theta_A}{Y_B} \right) (Y_C) \right] + \theta_B \dots (6)$$

$$D_C = \frac{D_B}{Y_B} \times Y_C \dots (7)$$

R_{c_4} = Radio de curvatura para el tiempo t_4

Y_C = Número de años entre los tiempos t_3 y t_4

θ_C = Cambio de dirección del desplazamiento durante Y_C

D_C = Magnitud del desplazamiento del centroide durante Y_C

Se puede usar el ángulo de migración del periodo previo ($\theta_C = \theta_B$) cuando solo hay dos registros de imágenes disponibles o donde las condiciones hidrológicas y geomorfológicas no cambien significativamente.

Mediante el cálculo de θ_C y D_C podemos ubicar el centroide del nuevo círculo que representará al meandro en el tiempo t_4 . Finalmente, a partir del centroide podemos trazar el círculo con radio de curvatura R_{c_4} .

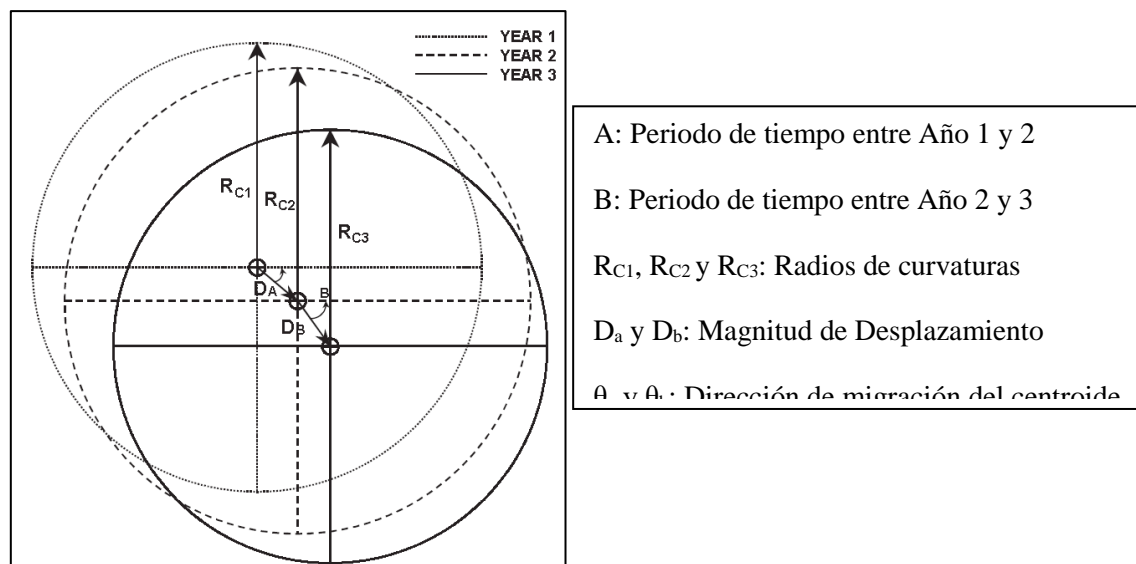


Figura 3.3. Diagrama que representa los radios de curvatura, magnitud de desplazamiento y dirección de migración del centroide de la curva durante los Periodos A y B.

Fuente: Handbook for Predicting Stream Meander Migration, Lagasse et.al, 2004.

3.2.1.3. Estudio de la migración del Río Madre de Dios en el tramo la Pastora

Con el fin de tener una visión general de la problemática, el alcance del estudio abarco desde la zona de la pastora hasta alrededor de unos 60 km aguas arriba de esta, donde el Río Inambari desemboca al Río Madre de Dios. Por los escasos registros de imágenes históricas de esta zona, de disponibilidad gratuita y que posean una gran calidad; se decidió abarcar un intervalo de tiempo de estudio de 30 años. Con estas imágenes se pretende predecir el desplazamiento del meandro para el año 2025.

Las imágenes fueron descargadas de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estas imágenes de los años 1985, 2000 y 2015 han sido tomadas por el satélite landsat durante las épocas de estiaje. La constelación Landsat es el sistema de satélite de observación de superficie de la tierra más antigua de EEUU del cual se obtienen datos desde 1972.

Se uso Arcgis 10.1 como sistema de información geográfico para el procesamiento de estas imágenes. Se utilizó combinación de bandas espectrales para poder delimitar cuerpos de agua y tierra, y se procedió a la digitalización vectorial del Río Madre de Dios para cada fecha en que las imágenes habían sido tomadas.

Luego mediante el comando de exportación de datos de Arcgis, la digitalización vectorial guardado bajo un shape file, fue traslado al software de diseño asistido Autocad. Ya En este se pudo trabajar con las líneas que identifican a las orillas del río convirtiéndolas en una serie de puntos. (Ver Figura 3.4)

En este estudio se identificaron 34 meandros en los años 1985, 2000 y 2015. Este conjunto de datos de puntos fue llevada a una hoja de cálculo elaborada para hallar, mediante estimación de mínimos cuadrados, la localización del centro y el radio de curvatura. Luego calculados los centros y radios de los círculos inscritos estos son dibujados en AutoCAD (ver anexo 3).

Una vez obtenidos la posición de los círculos y radios para cada meandro en los tiempos 1985, 2000 y 2015, se procede a unirlos en su centro con una línea que sigue un orden cronológico para cada periodo analizado (1985-2000, 2000-2015). Con esta línea se puede medir la dirección " θ " y distancia " D " con la que el meandro se dirige y desplaza. La dirección de migración del meandro se mide en sentido horario al este geográfico.

Adicionalmente, Se aplicaron las fórmulas dadas por Lagasse en el 2004 para calcular la tasa de migración del meandro $\frac{D}{Y}$, tasa de incremento de radio de curvatura ΔR_C y el cambio de dirección (anexo 2).

Se decidió calcular la predicción, para el año 2025, de los últimos 8 meandros debido a su cercanía a la zona la pastora. Para ello se usaron las fórmulas (5,6 y 7) descritas anteriormente, pero para un periodo de tiempo de 10 años que corresponde a los años 2015-2025 (anexo 5).

3.2.1.4. Resultados

Desde el periodo 1985-2000 al 2000-2015 ha ocurrido una aceleración significativa de la tasa de cambio del radio de curvatura para un 88% de los 34 meandros estudiados. De la misma forma, en un 76 % del total de meandros su tasa de desplazamiento del centroide se ha visto sometida a una aceleración durante estos periodos.

Para el meandro 28 (zona de la pastora) hubo una disminución del radio de curvatura de 1195.3 m para el año 1985, 1191.7 m para el año 2000 hasta 1110.6 m para el año 2015. Que resulta en una tasa de cambio del radio de curvatura de - 0.24 m/año para el periodo 1985-2000 a - 5.40 m/año para el periodo 2000 - 2015. Adicionalmente existió un aumento de la tasa de desplazamiento del círculo inscrito al meandro, de 1.10 a 8.78 m por año.

La predicción para el desplazamiento del meandro N°28 para el año 2025 indica que el centroide del círculo inscrito del meandro se desplazará 87.85 m en una dirección 316.33° (Respecto al Este Geográfico) y poseerá un radio de curvatura de 1056.49 m (ver anexo 5).

En el meandro N°34 (Llamado Nuevo Amanecer) tiene una tasa de cambio de radio de curvatura de 0.11 m/año y se ha desplazado a una tasa 0.47 m / año desde el 2000-2015. Se prevé que para el año 2025 el meandro se desplazara 4.78 m con un ángulo de 192°.

3.2.1.5. Conclusiones

De acuerdo a los resultados la gran mayoría de los Meandros estudiados en el tramo del Río Madre de Dios para el periodo 2000-2015, comparados con el periodo 1985-2000, estuvieron sujetos a desplazamientos y cambios de forma acelerada. Esto en los próximos años implica, un mayor nivel de riesgo de daños a propiedades e infraestructuras que se localizan a lo largo del curso del río.

El círculo circunscrito que describe al meandro 28 (Zona la pastora), según los resultados, se ha desplazado aceleradamente en los últimos 15 años a una tasa de 8 m/año y ha reducido su radio a 1110.6 m. Por lo tanto, el meandro se está haciendo más afilado y para el año 2025 obtendrá un radio de 1056.5m. Esto sugiere un riesgo importante en la margen derecha del río que dañaría inevitablemente a la carretera interoceánica de no existir algún tipo de protección. Además, esta protección no debe irrumpir de forma dramática las tendencias naturales que nos muestra el estudio pues implicaría riesgos importantes sobre el río y sobre la estructura misma.

La ciudad de Puerto Maldonado es bordeada por los meandros 28 y 34 los cuales producen un estrangulamiento, aun cuando el meandro 28 está siendo afectado por erosión acelerada el meandro 34 parece ser más estable. Pero si bien el riesgo a corto plazo no resulta ser importante para el meandro 34 en el meandro 28 si es requerido.

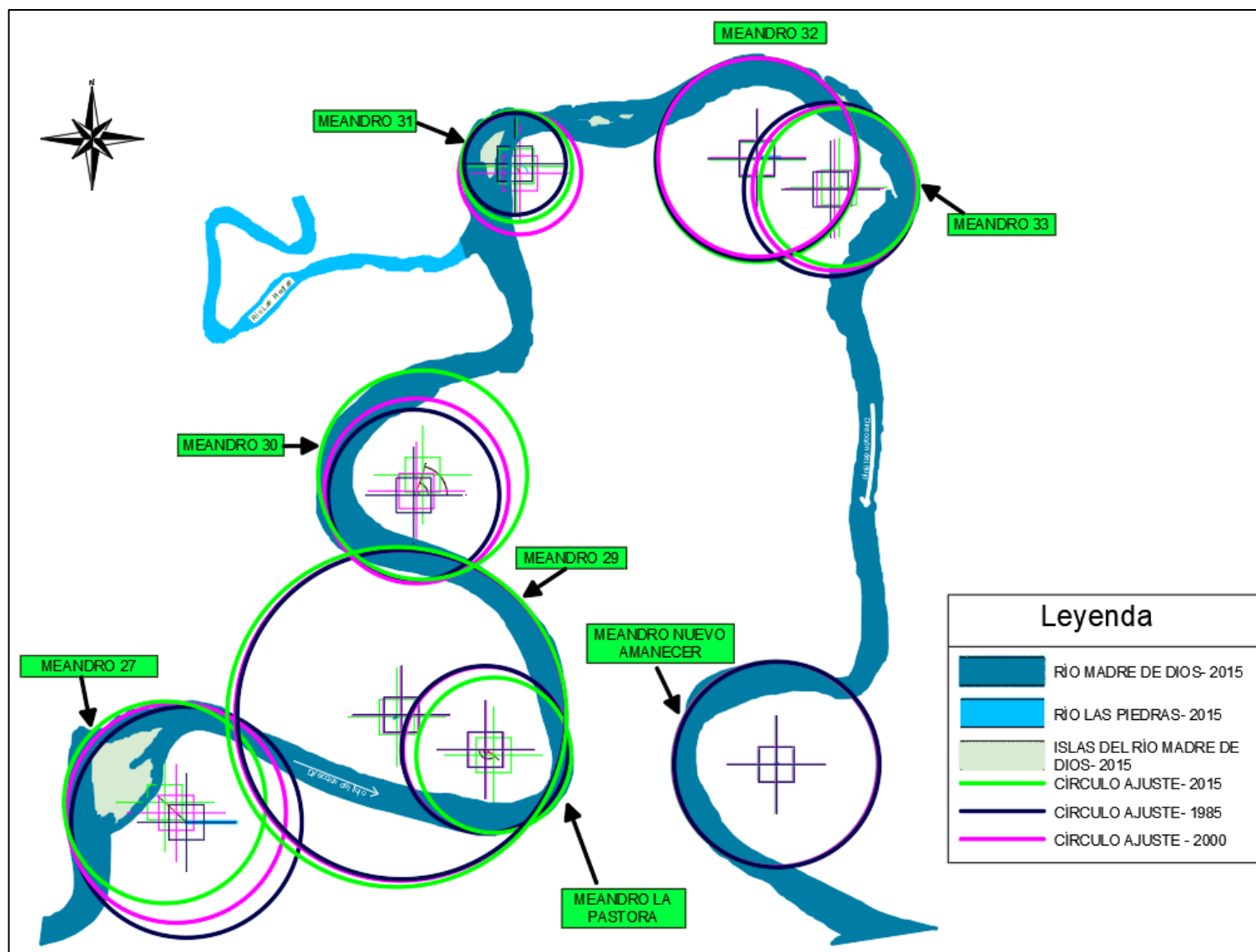


Figura 3.4. Círculos inscritos a la Curva de cada Meandro (desde el 27 al 34) para los diferentes Años (1985,2000 y 2015).

3.2.2. Estudios fundamentales para conocer las características del Río Madre de Dios

3.2.2.1. Estudios de Batimetría y Topografía

Los estudios de batimetría son necesarios para conocer la forma de la superficie del lecho del río que está cubierto con agua. Del otro lado con los datos de topografía podemos conocer la forma de la superficie no húmeda del cauce del río. Ambas superficies pueden ser representadas bajo un plano tridimensional mediante el uso de coordenadas X, Y y Z.

Una vez obtenidas la batimetría y topografía, podemos analizar los procesos de agradación y degradación que están ocurriendo en el Tramo del Río Madre de Dios. Esta información valiosa puede usarse para modelamiento hidráulico, ya sea para pruebas en modelos físico o en modelos numéricos. Además, con las secciones obtenidas a partir de estos estudios podemos hacer que cada diseño de los espigones fabricados con troncos de árboles tenga una configuración adecuada.

Los estudios de batimetría del río fueron realizados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para la constructora PRZ Ingenieros S.A.C. Mientras que la topografía fue realizada por personal técnico de la misma empresa. A continuación, se da un resumen de estos trabajos.



Figura 3.5. Área de trabajo del levantamiento topográfico y Batimétrico.

Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Los trabajos fueron realizados durante el mes de setiembre del año 2011, el cual concuerda con el periodo de estiaje del Río Madre de Dios. Estos estudios tuvieron un alcance de aproximadamente 5,0 km de longitud en un área de 172 ha, que abarca el tramo del Río Madre de Dios denominado La Pastora (Ver figura 3.5).

A. Trabajos de topografía

Los trabajos de topografía se hicieron para ambas márgenes del río (llanura de inundación a la izquierda y acantilados del lado derecho) en un área de 170 ha aproximadamente. Se utilizó el sistema UTM (Universal Travel Mercator)- Elipsoide WGS 84 Zona 19 sur la cual corresponde a la ubicación de Puerto Maldonado. Para el levantamiento de los puntos, usando una poligonal abierta, fueron usados los BM L26B Y M4 que corresponden a los hitos del Corredor Vial Interoceánico Sur Perú – Brasil. Finalmente, para el procesamiento de datos se usó el programa civil 3D generando curvas de nivel a cada 1m.

Las conclusiones que llegó el estudio son las siguientes:

- La cota de la superficie de agua del río Madre de Dios, durante los días de trabajo (estiaje), varió entre 170.24 msnm y 172.02 msnm.

- En la llanura de inundación, de la margen izquierda del río Madre de Dios, las cotas del terreno varían alrededor de los 168.36 msnm.
- La cota de la parte superior de los acantilados de margen derecha, en zonas cercanas a la carretera interoceánica es de 205.44 msnm aproximadamente.
- La altura promedio entre el nivel de la superficie de agua del río (set. 2011- Estiaje) y la parte superior de los acantilados en zonas cercana a la interoceánica es de $H = 35$ m aproximadamente.

B. Estudio de Batimetría

Para este estudio se tuvo en cuenta los requerimiento técnicos especificados de la Organización Hidrográfica Internacional, Bureau Hidrográfico Internacional y la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina del Perú.

El trabajo realizado en periodo de estiaje fue dividido en dos, registros de niveles de río para ir registrando la variación de tirantes, producto de las cambiantes condiciones hidrológicas del río; y el propio levantamiento batimétrico.

Los equipos para el levantamiento batimétrico fueron de 2 clases: geodésicos (receptores Gps geodésico diferenciales con 40 canales) y equipos hidrográficos (Ecosonda hidrográfica digital BATHY 500 DF Doble frecuencia). Para realizar el procesamiento de datos se uso uso del programa HYPACK MAX 2010. Adicionalmente se agregaron trabajos de muestreo de material en suspensión y recojo de muestras de suelo superficial del lecho del río para la cual se usó un muestreador de fondo (Draga tipo Van Veen) . Se concluyó con lo siguiente:

- La profundidad promedio del río en la época en que se efectuó el levantamiento batimétrico (Estiaje) es de 11 m y la profundidad máxima medida, en una zona donde desagua una alcantarilla pluvial, es de 15 m.
- En el tramo en estudio, el ancho superficial del río en el periodo de mediciones (Estiaje), varía entre 200 m a 290 m.
- La pendiente de la superficie de agua promedio en el periodo de mediciones varió de 2.1×10^{-5} a 6.2×10^{-5} .
- Del análisis granulométrico del material de cauce se obtiene un $d_{50} = 0.2$ mm

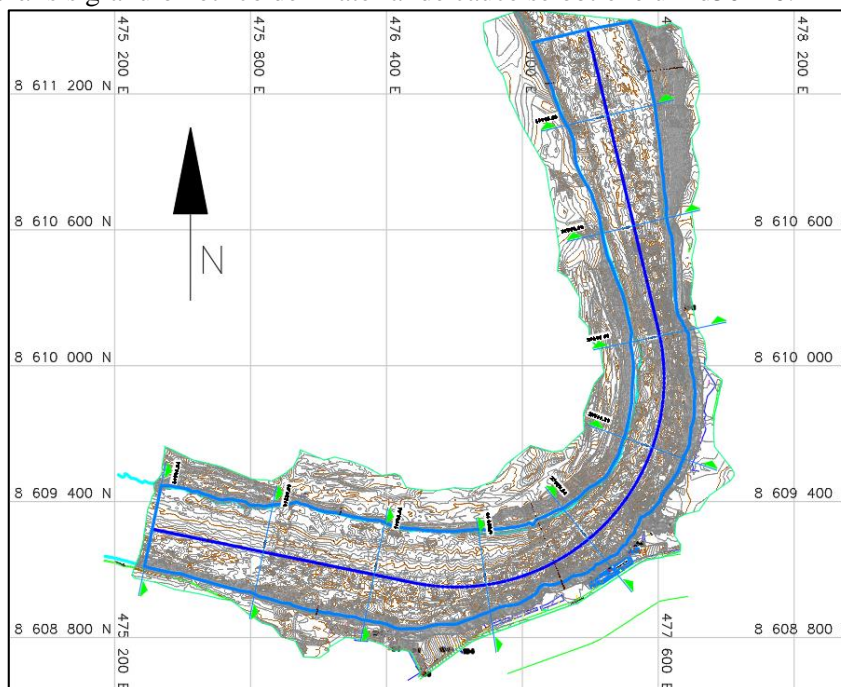


Figura 3.6. Topografía y Batimetría unidas.

Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

3.2.2.2. Estudio Hidrológico

La importancia de la hidrología en el diseño no puede ser subestimada. Mucho de la incertidumbre en el diseño de Estructuras de protección de ríos hechas de madera puede ser consecuencia de la ausencia de información hidrológica en forma de datos de calibración a largo plazo y fiables. Adicionalmente con el cambio climático la información del reciente pasado hidrológico se vuelve más sospechosa. La actual y el probable futuro régimen hidrológico deben ser comprendidos para predecir el flujo que podría ser encontrado durante la vida del diseño de una estructura de madera. (Knutson y Fealko, 2013).

Para el caso de la zona de estudio la Pastora los estudios hidrológicos fueron hechos por PRZ Ingenieros S.A.C para el consorcio IRSA Sur encargado del tramo afectado de la carretera interoceánica. Aun cuando la disponibilidad de registros de datos de caudales para el Río Madre de Dios fue escasa se logró conseguir el objetivo de hallar los caudales máximos de diseño, necesarios para el diseño de protección de la margen derecha del Tramos la Pastora.

A continuación, se resume de forma breve el informe del estudio realizado por PRZ en el año 2011.

Tabla 3.1. Parámetros de la Cuenca del Río Madre de Dios. Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Parámetros	Cuenca del Río Madre de Dios
Área hasta la zona La Pastora (km ²)	56 553
Perímetro (km)	1929.48
Longitud del Cauce Principal (km)	817.071
Pendiente Promedio del Cauce Principal (%)	0.0005
Factor de Forma (adimensional)	0.45
Índice de Compacidad (adimensional)	2.29
Altitud Media (m.s.n.m.)	1442
Pendiente de la Cuenca (%)	0.0031

A. Cuenca del Río Madre de Dios

La cuenca del río Madre de Dios geográficamente se ubica entre los 69°15' y 72°10' de longitud oeste, y entre los 11°19' y 14°40' de latitud sur. Limita por el norte con la cuenca del río Las Piedras, por el este con la cuenca del río Tambopata, por el oeste con la cuenca del río Urubamba, y por el sur con la cuenca del Lago Titicaca. El Río Madre de Dios es un afluente del río Madeira (Brasil), y pertenece a la cuenca del río Amazonas, tiene una variación altimétrica desde aproximadamente 171 msnm (en la zona de estudio en la zona La Pastora - Puerto Maldonado) hasta 5980 msnm en el límite de la cuenca con la cuenca del Lago Titicaca. (Informe PRZ. Ingenieros S.A.C, p.3, 2011). En la tabla se muestra 3.1 las características de la cuenca del río Madre de Dios.

B. Cálculo de los caudales Máximos de diseño

Para el cálculo de los caudales máximos de diseño fueron necesarios obtener datos de estaciones adecuadamente distribuidas dentro de la cuenca. Se identificaron 8 estaciones de las cuales solo 5 contaban con data suficiente de registros de precipitaciones máximas en 24 horas: Puerto Maldonado (256 msnm), San Gabán (635 msnm), Quincemil (772 msnm), Limbani (3183 msnm) y Olaechea (3420 msnm) (Ver Tabla 3.2).

Para poder determinar las precipitaciones maximas de 24 horas para diferentes periodo de retorno se tuvo que hacer una prueba de bondad para las estaciones que tenian suficiente información y para las que no, se hizo un con la ayuda del método ILLA desarrollado en el Estudio de la Hidrología del Perú, del convenio IILA – SENAMHI – UNI. Como resultados de este análisis se tiene la Tabla 3.3.

Tabla 3.2. Estaciones dentro de la cuenca del Río Madre de Dios. Fuente: Defensas Ribereñas - Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Nombre	Años de Registro	Latitud (S)	Longitud (O)	Altitud (msnm)
Puerto Maldonado	1992 – 1995 1998 - 2010	12° 35´	69° 12´	256
Salvación*	1987 2001 - 2005	11° 21´	69° 35´	520
Pakitza*	2002 -2005	11° 56´	71° 16´	350
San Gabán	1965 – 1988 1993 - 2010	12° 35´	69° 12´	635
Quincemil	1964 – 1977 1997 - 2010	13° 13´	70° 45´	651
Rocotal*	2000 – 2002 2005 2007	13° 06´	71° 34´	2010
Limbaní	1964 – 1977 1986 – 2004 2006 - 2010	14° 07´	69° 41´	3183
Ollachea	1963 – 1984 1986 1993 - 2010	13° 48´	70° 29´	3420

Tabla 3.3. Precipitaciones Máximas de 24 horas para diferentes periodos de retorno de las 8 estaciones identificadas. Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Periodo de Retorno (años)	Precipitación máxima de 24 horas (mm)							
	Puerto Maldonado (256 msnm)	San Gabán (635 msnm)	Quincemil (772 msnm)	Limbaní (3183 msnm)	Ollachea (3420 msnm)	Pakitza (350 msnm)	Salvación (520 msnm)	Rocotal (2010 msnm)
2.2	116.5	198.3	200.5	33.9	39.7	116.5	213.9	33.9
25	197.2	431.1	307.6	65.4	65.3	197.6	328.1	193.0
50	218.2	491.8	335.5	73.6	71.5	218.8	358.0	213.6
100	239.1	552.0	363.2	81.7	77.7	239.8	387.5	234.2
500	287.4	691.3	427.3	100.6	91.8	288.3	455.8	281.5

Esta información de máximas avenidas fue usada para calcular los caudales máximos de diseño. Con el fin de darnos una pauta para poder seleccionar los resultados adecuados, estos cálculos fueron realizados de dos formas.

- a. Marcas dejadas por máximas avenidas que han ocurrido en la zona
Este tipo de cálculo se basó en hacer inspecciones de campo y recopilar información de los máximos niveles del río alcanzado. Para tal efecto información de pobladores indicaron un máximo nivel de 180.5 msnm. Este dato junto con la pendiente, batimetría y topografía fueron llevados al software de

modelamiento numérico River2D. Luego se calibró este modelo numérico con datos de velocidad y caudales obtenidos de mediciones realizadas en el Río Madre de Dios por el laboratorio Nacional de Hidráulica. Como resultado se obtuvo un caudal de 10 500 m³/s que corresponde a un periodo de retorno de 8 años.

b. Con datos de precipitaciones máximas.

Para este estudio se requirió los datos de precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones hidrológicas estudiadas anteriormente (tabla 3.3). En segunda instancia se dividió la cuenca en subcuencas utilizando polígonos de Thiessen, y se aplicó el método del Hidrograma unitario de Snyder para calcular los caudales máximos en cada subcuenca. Finalmente, con estos datos y mediante la utilización del software de modelación hidrológica HEC-HMS V.3.4 se obtuvo los caudales máximos de diseño para diferentes periodos de retorno.

C. Conclusiones

Las conclusiones que llegaron al estudio fueron las siguientes:

- El río Madre de Dios no dispone de un registro de máximas avenidas, por lo que se han generado las máximas avenidas a partir de datos de precipitaciones máximas de estaciones hidrológicas ubicadas adecuadamente dentro de la cuenca.
- Para los cálculos de caudales máximos se han usado los datos de precipitación máxima de 24 horas registrados en estaciones pluviométricas y aplicando el programa HEC-HMS V. 3.4. Finalmente se han obtenido los caudales máximos de diseño, se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Caudales máximos de diseño a ser usados en el proyecto de defensas ribereñas.

Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Periodo de retorno T (años)	Qmax (m ³ /s)
2.2	8003
25	12997
50	14341
100	15789

3.2.2.3. Estudios de Suelo

Las estructuras de madera utilizadas para proteger los bancos de ríos se anclan al lecho con el fin de lograr mayor estabilidad estructural ante fuerzas motrices hidráulicas. El aporte del relleno del suelo por encima de la longitud de anclaje en forma de fuerzas pasivas y fuerzas del peso del suelo ayuda a mantener la estabilidad de la estructura dentro del río. Por ende, surge la necesidad de conocer las propiedades del material usado que generalmente provienen del mismo talud encontrado.

El estudio de suelos en el Río Madre de Dios fue necesario para conocer las propiedades mecánicas del suelo encontrado sobre la margen derecha (taludes) y sobre la margen izquierda (llanura de inundación). Analizar la inestabilidad de los taludes que ponen en riesgo los acantilados situados en la margen derecha del Río Madre de Dios ayuda a comprender la problemática real de erosión. Además, determinar las propiedades del suelo ayuda a comprender sobre qué material estamos emplazando los espigones y saber qué medidas tomar sobre esto. A continuación, se menciona de forma muy resumida el estudio de suelo realizado por PRZ Ingenieros.

A. Descripción Geológica de la Zona la Pastora

La ciudad de Puerto Maldonado se encuentra emplazada sobre una colina baja de suelos residuales de la Formación Madre de Dios del tipo arcilloso, areno-limoso a limo-arcilloso, que tiene un desnivel de 25 a 30 m con respecto al cauce de los ríos Madre de Dios y Tambopata. Gran parte de la ciudad de Puerto Maldonado se encuentra asentada sobre suelos arcillosos inorgánicos de baja a media plasticidad (CL), de consistencia suave a media. En algunos sitios aislados se tiene suelos

arcillosos de alta plasticidad (CH), de consistencia suave a muy suave, muy húmedos a saturados. (PRZ, 2011, p.8).

El riesgo asociado a la zona la pastora está vinculado con los deslizamientos de los taludes debido la socavación por acción fluvial, pendiente y el tipo de suelo encontrado. El material de suelo encontrado por lo general es medianamente permeable y se encuentra sometido a acciones significativas de intemperismo.

Según las secciones del río obtenidas a partir del estudio topográfico; en la margen derecha del río podemos encontrar inclinaciones de taludes desde 18 a 55 grados con alturas de 4 a 30 m. Las progresivas más afectadas van desde 1+300 hasta 3+750 , pero de especial riesgo tenemos las 2+500 con una máxima inclinación de talud de casi 55° (Ver Figura 3.7).

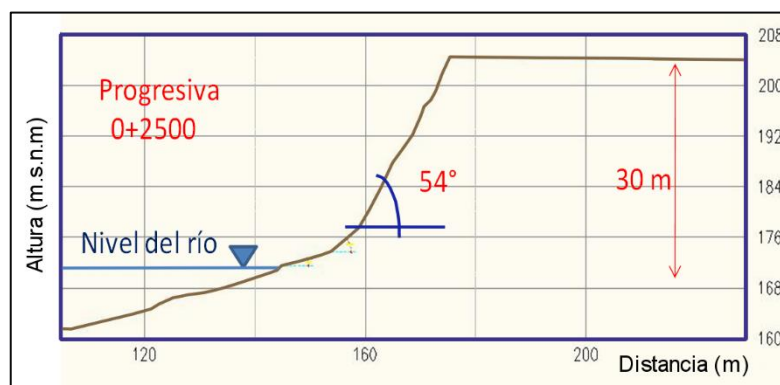


Figura 3.7. Sección crítica de la Pastora ubicada en la progresiva 2+500.

Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

B. Procedimiento de muestreo de calicatas

Para conocer las características físico mecánicas de los suelos en la margen izquierda y derecha del río Madre de Dios en la zona denominada la pastora fue necesario recoger muestras de suelo usando calicatas. El número total de muestras fue de 8 (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D8 y D9) las cuales fueron de características alteradas e inalteradas. Las muestras inalteradas D4 Y D8 fueron usadas para hacer el estudio de corte triaxial consolidado no-drenado con medición de poros (CU). La muestra D6 fue recogida en la llanura de inundación, la muestras D1, D2, D3 se hicieron sobre la corona del talud y las muestras D5-D8 se tomaron del talud (Ver Figura 3.8).



Figura 3.8. Ubicación de calicatas.

Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

C. Resultados de Ensayos de Suelos

Las muestras de suelo tomadas de las calicatas fueron llevadas al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de ingeniería, donde para la clasificación de suelos se usó el sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS).

De los resultados de los ensayos (ver tabla 3.5), se puede decir que el material de la margen derecha es clasificado dentro de las tablas de SUCS como SM (Arena limosa) y SP-SM (Arena pobremente Graduada con Limo) con cierta cementación. El material posee coeficientes de permeabilidad del orden de 10^{-4} cm/s que indica que es semi impermeable. Además, de las observaciones en campo se puede asumir que el talud es homogéneo y está compuesto por arena limosa SM sin plasticidad con un porcentaje de humedad promedio de 4 a 8% y una densidad húmeda de 1.6 tn/m³. De las muestras inalteradas que se usaron para el ensayo de corte triaxial obtenemos resultados de una variación de ángulo de fricción interna desde 33.1° a 34° (PRZ, 2011, p.14).

Tabla 3.5. Clasificación de suelo de las muestras obtenidas de la calicata. Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Muestra	Grava %	Arena %	Finos %	Clasificación SUCS
D-01	0	75.1	24.9	SM
D-01	Ge= 2.663			
D-02	0	47.0	53.0	ML
D-02	Ge= 2.670			
D-03	1.3	56.4	42.3	SM
D-03	Ge= 2.677			
D-05	0	29.7	70.3	ML
D-05	Ge= 2.706			
D-09	0	93.7	6.3	SP
D-09	Ge= 2.703			
Muestra	Ensayo Triaxial	F	C (Kpa)	Clasificación
D-04	CU	33.1°	0	SM
	Grava: 0%	Arena: 65.6%	Fino :34.4 %	
D-08	CU	34.4°	5.3	SP-SM
	Grava: 0%	Arena: 90.1%	Fino :9.1 %	
Muestra	Grava %	Arena %	Finos %	Clasificación
D-06	45.6	53.6	0.5	SP
	Ge= 2.760			

D. Análisis de estabilidad de taludes

Con el uso del programa SLIDE y mediante los métodos de Bishop y Spencer, se evaluó la estabilidad de taludes. Estos taludes fueron representativos de la zona, y poseían una altura de 30 m y pendientes de 54°,45° y 36°. Se asumió que el material era homogéneo de tipo arena limosa (SM) con un porcentaje de humedad de 4% y densidad húmeda de 1.6 tn/m³. El ángulo de fricción interna F fue de 34.4 °. De forma conservadora se usó un periodo de recurrencia de sismo de 500 años.

Se concluyó que los taludes para los ángulos desde 36° a 54° son estables. La estabilidad del talud está relacionada con el grado de cohesión del suelo. Además, se obtuvo un coeficiente de seguridad de 1 que indica que las fuerzas resistentes son mayores que las fuerza que generan la inestabilidad.

De lo anterior podemos inferir que la inestabilidad de los taludes se debe a los esfuerzos de corte de origen fluvial que se producen en el pie del talud, y no a las características de suelo e inclinación de los mismos. Esto hace que los taludes aumenten su inclinación ocasionando que el material exceda

su ángulo de reposo y falle. Por lo tanto, si se requiere mantener un estado de equilibrio se recomendaría instalar algún tipo de protección contra la erosión.

E. Conclusiones

- La formación Madre de Dios, de suelos residuales, se encuentra debajo de la ciudad de Puerto Maldonado; formando colinas bajas que están a un nivel de 30 m por encima del Río Madre de Dios. Los tipos de suelos encontrados en el tramo del río denominado la Pastora son clasificados según SUCS del tipo arenoso SP en la margen izquierda y del tipo arena limosa de grano fino SM en la margen derecha.
- Los problemas de los acantilados en la margen derecha del Río Madre de Dios son producidos por erosión fluvial al pie del talud, el cual ocasiona un aumento de la pendiente que supera al ángulo de reposo y hace que estos se desmoronen. Para evitar este fenómeno se recomienda utilizar espigones como protección.
- El agua que transita por las cárcavas, que se ve intensificada durante el periodo de lluvias, genera sobre los taludes el arrastre de partículas. Para mantener la estabilidad del talud con respecto a este problema se recomienda realizar obras de drenaje de aguas sobre la corona al fin de evacuar estas de forma correcta hacia el Río. Además se puede sembrar algún tipo de vegetación o usar biomantas para poder impermeabilizar los taludes.
- Para las cárcavas adyacentes a las quebradas se recomienda revestir de algún tipo de material como colchones de piedra, gaviones, revegetación o concreto para poder evacuar las aguas hacia el Río Madre de Dios sin perjudicar los taludes.

3.2.2.4. Estudio del Río en un modelo Numérico

En los Modelos de simulación numérica se emplea, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de borde, que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos (Anónimo).

Como parte de un proyecto de investigación, donde se contó con la cooperación de la Universidad Stony Brook University del estado de New York – USA y el Laboratorio Nacional de Hidráulica; se realizó una simulación numérica del meandro la Pastora. El objetivo de esta simulación era corroborar los resultados del código implementado por el doctor Sotiropoulos con los resultados posteriores del modelo físico construido en las instalaciones del LNH. El estudio está siendo llevado a cabo por Ali Khosronejad (SBU) y Luis Castro (LNH). Los primeros resultados fueron usados en primera instancia, para comprender la hidrodinámica del Río Madre de Dios y elaborar un primer esquema de diseño.

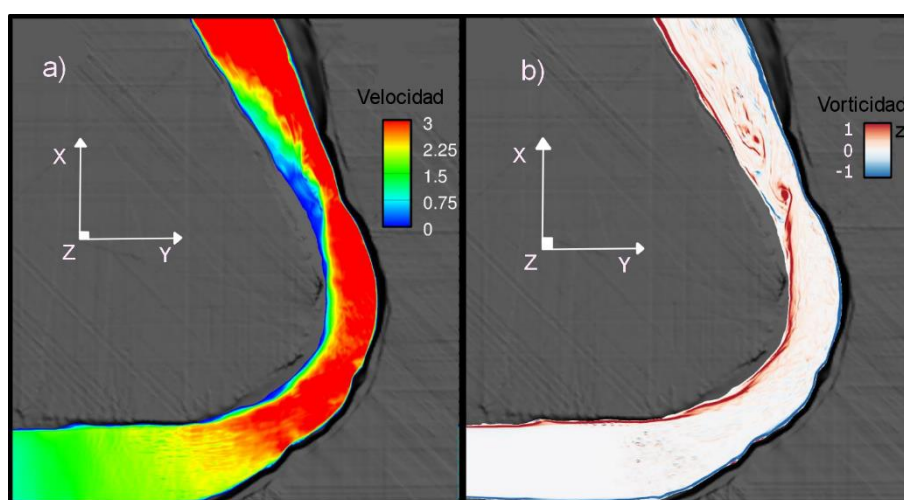


FIGURA 3.9. Resultados de la simulación Numérica.

Fuente: Simulación Numérica de La Hidrodinámica y Transporte de Sedimentos en el Modelo Hidráulico del Río Madre de Dios (Inédita), Ali khosronejad, Luis Castro y Julio Kuroiwa, 2016.

Los resultados se presentan mediante imágenes con gamas de colores (ver figura 3.9). En el lado izquierdo se puede apreciar el cambio en intensidad de las velocidades cuando ingresan hacia el meandro; los valores de velocidad son casi nulos en la llanura de inundación mientras que en el resto del toman valores cercanos a 3 m/s (color rojo). De lado derecho de la imagen, se aprecian las vorticidades que causan arrastre de sedimento. Estas son más superficiales del lado de la llanura de inundación (~ 1) mientras que del lado de la margen derecha son más profundas (~ -1). Así mismo podemos apreciar que al finalizar el meandro, en donde se constriñe el cauce, se registran las mayores.

3.2.3. Concepción del diseño de los Espigones Fabricados con Troncos de Árboles

Los espigones fabricados con troncos de árboles desarrollados para esta investigación tuvieron sus bases en los conceptos foráneos de Ingeniería de Atascos de Troncos (IAT), los cuales fueron narrados en el capítulo de consideraciones teóricas.

Las condiciones naturales del Río Madre de Dios en el tramo “La Pastora” (caudal de 14341 m³/s para un periodo de retorno de 50 años) representan un riesgo significativo para las estructuras hechas de madera. Aun cuando el diseño se basa en los conceptos de IAT, para que los espigones se adapten a este río, se decidió realizar una geometría de espigón y disposición de troncos de elaboración propia.

3.2.3.1. Elección del tipo de madera

Una apreciación equivocada con respecto al uso de la madera para diseños en ríos, representa un obstáculo a la integración de este material en proyectos de restauraciones. Esta percepción equivocada es refutada al tomar en cuenta la historia geológica de la madera en ríos durante los últimos 6000 años en los cuales la madera ha sido una parte integral de ambientes acuáticos. La madera dentro de los ríos puede durar muchísimos años, dependiendo de las especies de árboles y condiciones de preservación. (Tim Abbe y Andrew Brooks , 2010)

Las condiciones a las que se ve sometida la madera en el diseño de estructuras fabricadas con troncos de árboles son de estado cambiante debido a las condiciones hidrológicas de los ríos. Debido a esto, tendremos madera que se encuentra sumergida y madera expuesta por encima del nivel del agua. Para la primera las características físicas suelen preservarse bajo un estado de continua humedad mientras que para las segundas puede utilizarse ciertos tratamientos químicos modernos que mantienen en excelentes condiciones a la madera.

La elección se realizó de acuerdo a los tipos de madera encontrados en las zonas cercanas al lugar del proyecto para disminuir un costo de traslado. Además, la madera que crece en la zona, se mimetiza de mejor forma y ayuda a mantener las características ambientales del río. Para la elección del tipo de madera se debe tener presente que esta madera abunde en la zona de trabajo y replantar acciones de reforestación cuando esta se requieran.

Las propiedades que se deben tener en cuenta para la elección son tanto las físicas como las mecánicas, pero especial consideración se debe tener con la propiedad física llamada densidad. Mientras más densa sea una madera mayor será su dureza y menor la capacidad de absorción de agua que alterara su densidad, esto es crítico a la hora de hacer un balance de fuerzas. En general se utiliza de forma conservadora la densidad seca o verde de la madera en cálculos de balance de fuerza. Una madera más densa es más dura y por lo tanto más resistente a los agentes biológicos, adicionalmente si el peso de la madera es mayor menos flotabilidad va a tener.

En la elección de madera hemos tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Zona de crecimiento
- Altura máxima del tronco
- Altura comercial
- Diámetro a la altura del pecho (d.a.p)
- Densidad básica

- Diámetro de la troza

Para el diseño se optó por escoger a la madera Capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), este tipo de árbol crece en Amazonas, San Martín, Huánuco, Loreto, Madre de Dios y Ucayali. Su densidad básica es de 0.76 gr/cm³ lo cual la hace una madera relativamente pesada, el diámetro es de 0.6 m y la altura de este árbol oscila entre 15 a 35 m.

3.2.3.2. Geometría del espigón

Los espigones fueron diseñados manteniendo una forma cubica y evitando su esbeltez. Con el fin de fomentar la estabilidad y evitar su vuelco, debido a los momentos que producen la fuerza de arrastre y las presiones hidrostáticas. Además, como un significativo aporte biológico de este tipo de estructura, esta forma ayuda a crear hábitats y refugios para peces e invertebrados. Dicha forma también ayudaría a acceder a los espigones durante su colocación y para posibles trabajos de mantenimiento.

El espigón cuenta con una altura sumergida H_{sum} para el caudal de diseño elegido con un periodo de retorno establecido, más un borde libre H_{lib} (de ser el caso) de aproximadamente 2 m para cubrir posibles excedencias de flujo. La profundidad o ancho del espigón B_{Esp} tiende a aproximarse a la longitud H_{sum} para efectos de trabajo, creación de hábitats y estabilidad. La longitud del espigón es la suma de su longitud de trabajo L_t y la longitud de empotramiento L_e , la primera depende del alineamiento que se dio en el trazo en planta de los espigones y hasta donde la punta de estos llegaría; y la segunda es un porcentaje de la longitud de trabajo que varía entre los rangos del (6-11) % de la longitud de trabajo.

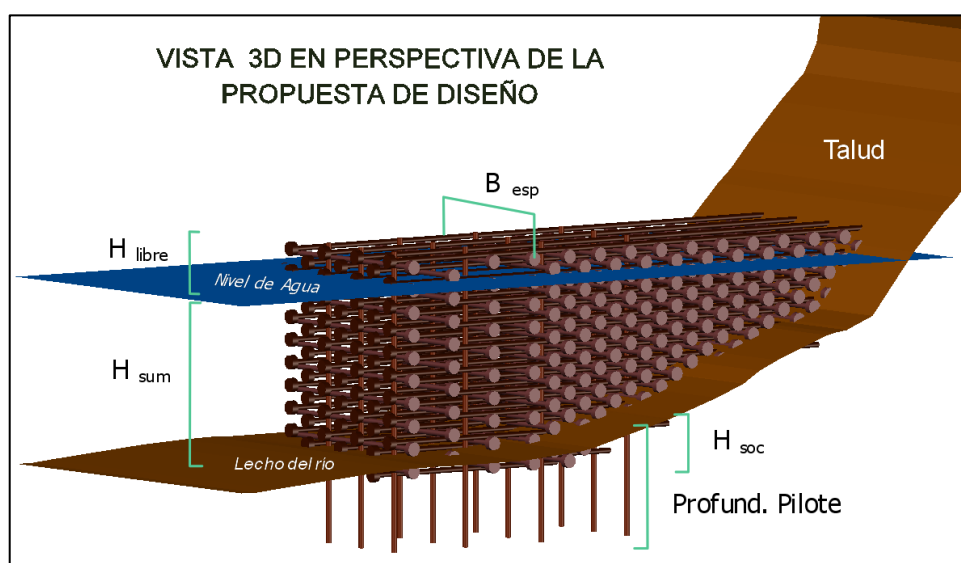


Figura 3.10. Propuesta de diseño de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.

La longitud de empotramiento para los espigones fabricados con troncos de árboles obedeció al estudio de estabilidad de taludes realizado por PRZ en la zona la Pastora. En este estudio se concluyó que los taludes encontrados con ángulos de 18° a 54°, de material de suelo del tipo SM, eran estables bajo los ángulos de 36° a 54°. Por lo tanto, la estructura se planeó que sea de tipo escalonado en el extremo anclado a la orilla con el fin de mantener la inclinación natural del talud; de esta manera mientras el espigón alcanza su altura de diseño, la longitud de empotramiento se va adaptando a su forma.

Además de la longitud H_{sum} y H_{lib} , los espigones cuentan con una longitud de entramado enterrada en el lecho llamada H_{soc} de aproximadamente de 3 m, que cubre los efectos de socavación que se darán en el tiempo de vida útil del espigón. Estas profundidades de socavación fueron tomadas en un inicio de un modelo numérico para luego ser verificados durante los procesos de experimentación en el modelo físico. (Ver en detalle en el anexo 6)

3.2.3.3. Disposición del entramado

Para el entramado se usan troncos con fajos de raíces apuntando hacia aguas arriba con el fin de aprovechar la captura de material de sedimentos y troncos (estos conceptos son tomados de la IAT). El entramado consta de tres tipos de troncos denominados: espigones orientados perpendiculares al flujo (miembros claves), espigones orientados en dirección del flujo y pilotes; los dos primeros con su fajo de raíz. Las dimensiones del tipo de árbol seleccionado para el diseño son las siguientes: diámetro de la troza, diámetro promedio del fajo de raíz, longitud promedio del fajo de raíz y altura de la troza. Con estas dimensiones se generó una disposición de entramado donde los troncos no se interceptaban uno a uno, facilitando el cálculo de la permeabilidad.

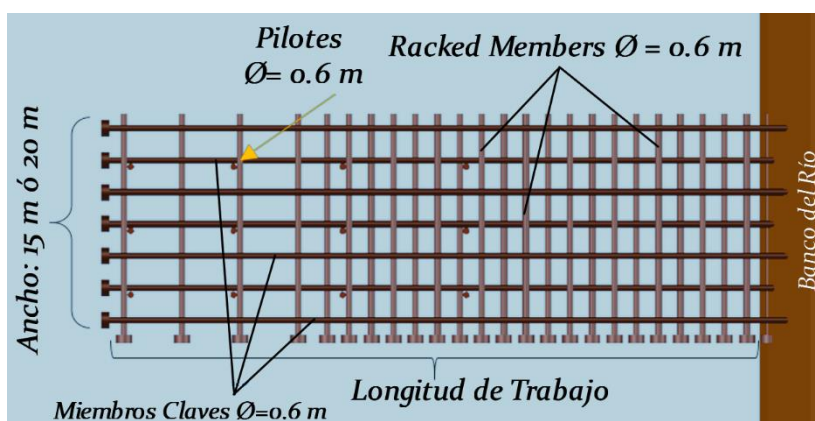


Figura 3.11. Vista en planta de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.

En esta investigación la permeabilidad se consideró como un porcentaje de área libre del espigón, a través del cual pasa el flujo del agua, con respecto del área total sumergida del espigón. Para su cálculo solo bastó determinar el área libre del espigón de la cara más aguas arriba de los espigones, proyectada de forma perpendicular a la dirección del flujo.

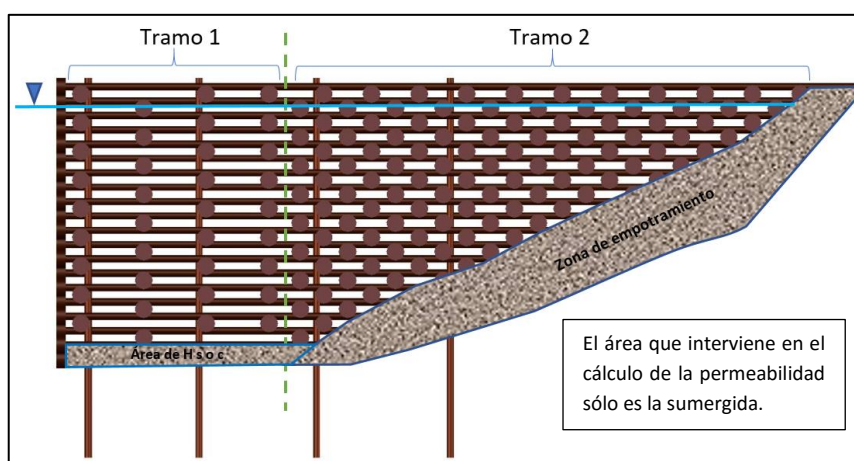


Figura 3.12. Vista en dirección del flujo, de un Espigón Fabricado con Troncos de Árboles.

Con el propósito de evitar que ingrese un flujo acelerado cercano al talud en la zona de campo de espigones y para disminuir la erosión en la punta del espigón producto de la obstrucción del flujo; se dispuso de tramos de permeabilidades. La permeabilidad dentro del espigón se repartió hasta en tres tramos diferentes que iban reduciendo su valor de permeabilidad conforme se acercaban a la orilla. Esta metodología fue empleada durante una investigación realizada en el 2013 titulada “El Diseño y aplicación de espigones Permeables” (Yongtao Cao, Peiqing Liu, Enhui Jiang).

La permeabilidad total del espigón aun así se mantiene en el orden de 33 % al 37 % aproximadamente. El uso de una permeabilidad de casi 35 % se apoya en el estudio realizado por

Brown en 1984 para la FHWA; en donde se menciona la relación entre ángulo de expansión de flujo y permeabilidad. Mientras más permeable sea un espigón menor va a ser la longitud del banco protegido aguas abajo de este. Además, para espigones que lleguen a alcanzar una permeabilidad de hasta el 35 % protegerán la misma extensión de longitud aguas abajo que un espigón impermeable.

Tabla 3.6. Ejemplo de cálculo de permeabilidad de un espigón.

Verificación de Permeabilidad			
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Área	127.5	143.2	0
A. obs.d flujo	22.428	22.428	0
A. Obs.d.Perp	68	49.42	0
A. Obs.Parc.sumer	2.772	4.7971	0
Total	93.2	76.6451	0
A libre	34.3	66.5549	0
Permeabilidad	26.9	46.5	0
Permeabilidad Total			37.3

Cabe mencionar que las características geométricas a detalle de la propuesta de diseño y de la disposición del entramado pueden verse en los planos del anexo 7.

3.2.4. Elaboración del esquema de diseño

3.2.4.1. Extensión de trabajo de los espigones

La extensión de protección con espigones en la curva del río Madre de Dios (Zona la Pastora) fue determinada en un principio en base a los criterios desarrollados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Estadounidense (1981). Los investigadores del estudio recomiendan que la extensión de protección requerida para un meandro debe ser determinada geométricamente usando el ancho medio de la superficie del agua W . El punto de inicio de los espigones es hallado trazando una tangente desde el inicio del lado convexo hasta interceptar la parte cóncava, desde este punto se mide una distancia hacia aguas arriba W . El punto final hasta donde debe llegar la protección, es una distancia $1.5 w$ aguas abajo medido a partir del punto donde finaliza la parte cóncava.

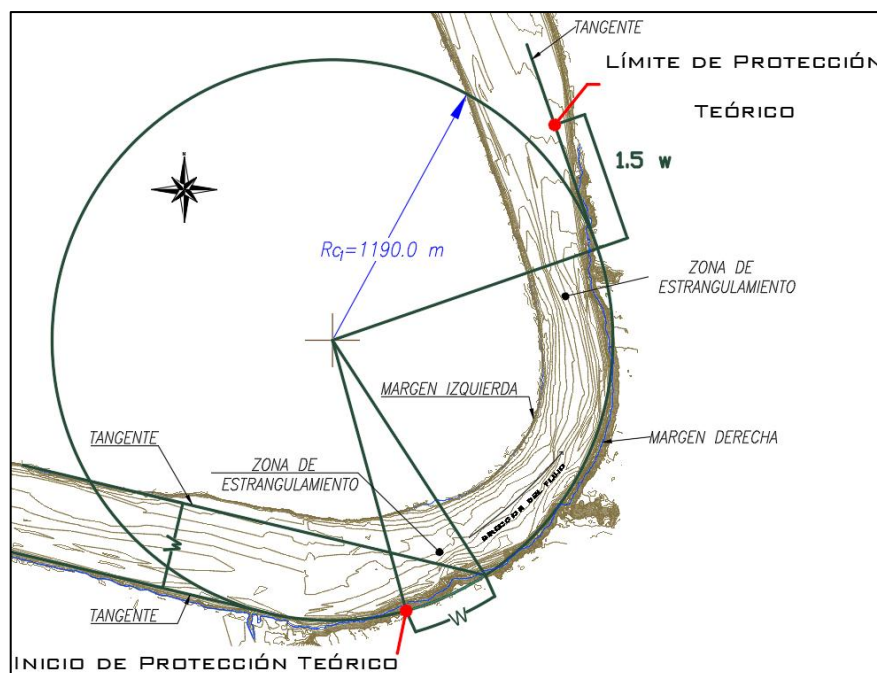


Figura 3.13. Extensión de trabajo teórico de los espigones.

El ancho medio del río W era de 424 m aproximadamente; por lo tanto, se obtuvo una distancia de protección aguas arriba de 424 m y una protección aguas abajo de 636 m. Los anteriores criterios solo fueron usados como un punto de inicio, pues las características específicas de la pastora requerían de un análisis adicional. Del modelo numérico se pudo observar (en el inicio de la curva) que las velocidades del flujo se intensificaban desde un punto rígido cubierto de vegetación justo a unos metros aguas abajo del punto señalado por el método. Del otro lado, aguas abajo, también se pudo observar que las velocidades se intensifican en la saliente del meandro debido a un estrechamiento del río y el método de USACE en esta zona es difícil de aplicar. La extensión de trabajo de protección de espigones llegaría hasta este punto de estrechamiento y hacia aguas más abajo se debe usar otro método para proteger los bancos.

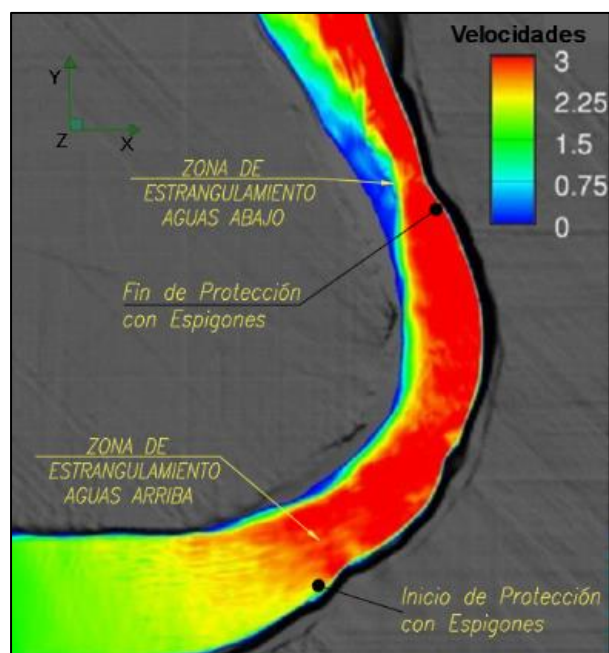


Figura 3.14. Extensión de trabajo de los espigones.

3.2.4.2. Longitud, Orientación y Espaciamiento

Una vez ubicada la extensión de trabajo de los espigones se identificó la forma del meandro mediante radios de curvatura. El método usado para trazar estos radios es el mismo que se empleó para calcular la tasa de erosión del meandro la pastora en el título 3.1. El proceso fue iterativo hasta lograr el mejor ajuste de los círculos que describen la forma del meandro.

A partir de la extensión de trabajo y en base al criterio del diseñador, se traza la nueva margen del Río. Esta línea une los extremos de los espigones e indica la cantidad de orilla que queremos recuperar. Para determinar la nueva margen, se adoptó que los espigones alcanzaran una longitud alrededor del 20 % del ancho del río siguiendo las recomendaciones de Brown (1984) y Maza Álvarez (1989).

Luego de esbozar la nueva margen se procede a ubicar cada uno de los espigones usando los criterios de orientación y espaciamiento nombrados en el capítulo de consideraciones teóricas (Ver título 2.3). Para determinar el espaciamiento entre espigones se usa el concepto de ángulo de desviación de flujo para estructuras permeables. Este ángulo se halla mediante el gráfico desarrollado por Brown en 1984 que relaciona permeabilidad, restricción del ancho del río y ángulo de desviación de flujo (ver figura 2.19).

Del gráfico mencionado, para una permeabilidad del 35% y una restricción del flujo de aproximadamente el 20% del ancho del canal, obtenemos un ángulo de desviación de flujo de 17 °. Esto nos sirvió como punto de partida, pero no determinó el trazo final de los espigones.

En los espigones impermeables el ángulo de orientación juega un rol importante en su comportamiento dentro del río. Sin embargo, como menciona Brown (1984), para espigones permeables del tipo retardadores es indiferente esta orientación. Él sugiere que por consideraciones económicas esta clase de espigones debe orientarse de forma perpendicular al flujo.

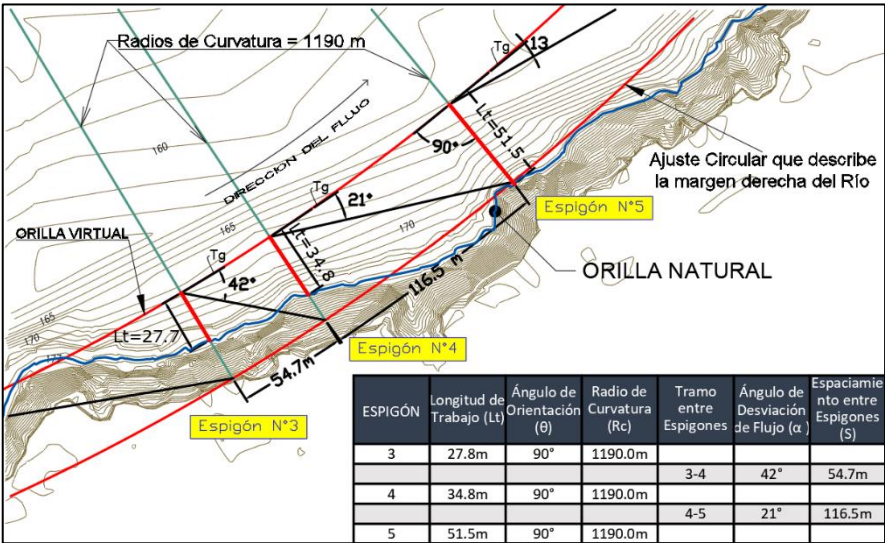


Figura 3.15. Detalle del espaciamiento entre espigones de la alternativa de diseño N°1.

Dentro de nuestro esquema, en una primera instancia, a los espigones se les asignó una orientación de 90° con respecto a la dirección del flujo. No obstante, al observarse que la orientación del primer y último espigón era uno de los factores que provocaban cambios hidráulicos y morfológicos significativos sobre el río; se decidió ir optimizándola hasta encontrar la mejor (ver figura 3.15).

Como se conoce la ubicación del primer espigón juega un rol importante en la de los demás. Está sometido a mayores fuerzas hidráulicas y cambia el comportamiento de todo el flujo hacia aguas abajo. Con respecto a la orientación del ultimo espigón, existía un estrangulamiento debido a la presencia de un punto rígido de vegetación; y para evitar su degradación se decidió ir cambiándola.

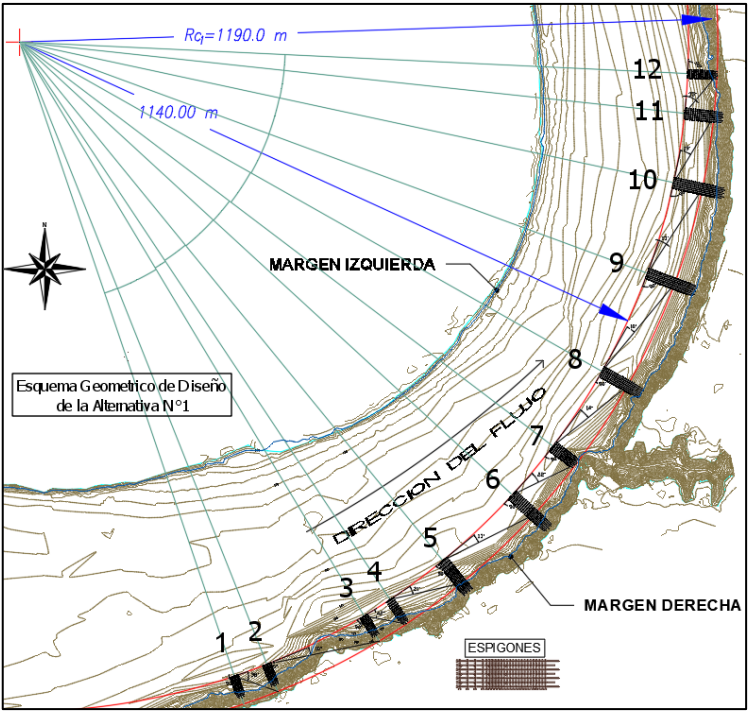


Figura 3.16. Esquema de diseño - Alternativa de diseño N°1.

Luego de revisar toda la teoría disponible con respecto a espigones permeables e impermeables y haber asignado en base a criterios la longitud, orientación y espaciamiento; se logró hacer el trazo inicial de los espigones. No obstante, la forma del Río (Estrechamiento a la entrada y salida del meandro) y la presencia de estructuras como el Embarcadero “La pastora”; condicionaron la ubicación en planta de los espigones. Por esta razón y con criterio, se cambió de forma conservadora los ángulos de desviación de flujo para poder espaciar a los espigones adecuadamente en la extensión de trabajo.

Cabe resaltar que el ángulo de desviación de flujo para una permeabilidad del 35% es 17° , esto suponía una disposición de espigones demasiado cercana y antieconómica. Por consiguiente, al momento asignar nuevos espaciamientos, estos fueron validados comparándolos con las recomendaciones de otros autores como los mostrados en la tabla 2.4. La siguiente figura muestra el esquema de diseño de la alternativa N°1 (ver figura 3.16). En esta figura se aprecia los ajustes circulares y sus respectivos radios de curvatura. Además, en este esquema se ha asignado una orientación para el primero y ultimo espigón de 120 grados y para el resto de 90 grados.

3.2.5. Análisis de estabilidad de la Estructura

Al haber finalizado el esquema de espigones en planta se pudo empezar a realizar el cálculo de estabilidad estructural. El procedimiento demanda datos de hidráulica, suelos, batimetría y topografía. Así mismo, requirió los datos de la geometría del espigón y la disposición del entramado, gobernados por el grado de permeabilidad de la estructura.

La metodología del cálculo de estabilidad, cuyos autores son knutson y Fealko, ha sido explicada de forma detallada en el capítulo de consideraciones teóricas. Sin embargo, sufrió algunas modificaciones para ser adaptada a la complejidad de la propuesta de la geometría del diseño y las condiciones hidráulicas del río Madre de Dios.

El análisis se basa en el uso de factores de seguridad que son el promedio entre las fuerzas resistentes y las fuerzas motrices. Su valor comparado con los coeficientes de daño de seguridad pública y daño a la propiedad dados en la tabla de knutson y Fealko (ver tabla 3.7); nos indicará si la estructura tiene una respuesta positiva a las fuerzas desestabilizadoras, o no. Cabe decir, que para el balance de fuerzas la estructura compuesta de varios miembros, fue considerada como un todo para facilitar su cálculo.

A continuación, se presenta a modo de ejemplo el cálculo de estabilidad para un espigón de madera para un periodo de retorno de 50 años, El riesgo de seguridad pública y daño a la propiedad se ha considerado Alto- Moderado.

Tabla 3.7. Coeficientes de seguridad usados en el diseño. Fuente: Large Woody Material Risk Based Design Guidelines, knutson y Fealko, 2014.

Riesgo: Seguridad pública - Daño a la propiedad	Criterio de diseño	FOS Deslizamiento	FOS Flotabilidad	FOS Rotación y Vuelco	Coeficiente importancia
Alto-Alto	100- años	1.75	2	1.75	1
Alto-Moderado	50-años	1.5	1.75	1.5	0.9
Alto-Bajo	25-años	1.5	1.75	1.5	0.8

3.2.5.1. Descripción de la geometría del espigón y las condiciones hidráulicas

El espigón cuenta con un tirante sumergido de 17.7 m, un borde libre de 2 m y una altura sumergida en el lecho para cubrir la socavación de 2.4m. Además de poseer un ancho de 20 m y una longitud de trabajo de 58.4m. Los espigones están empotrados en el talud para aumentar la resistencia a la flotación y al deslizamiento una distancia que va variando para adaptarse a su forma. La disposición

de los troncos es de forma alternada tanto en dirección al flujo como perpendicular a este; ajustándose en el caso del sentido del flujo a la permeabilidad del espigón.

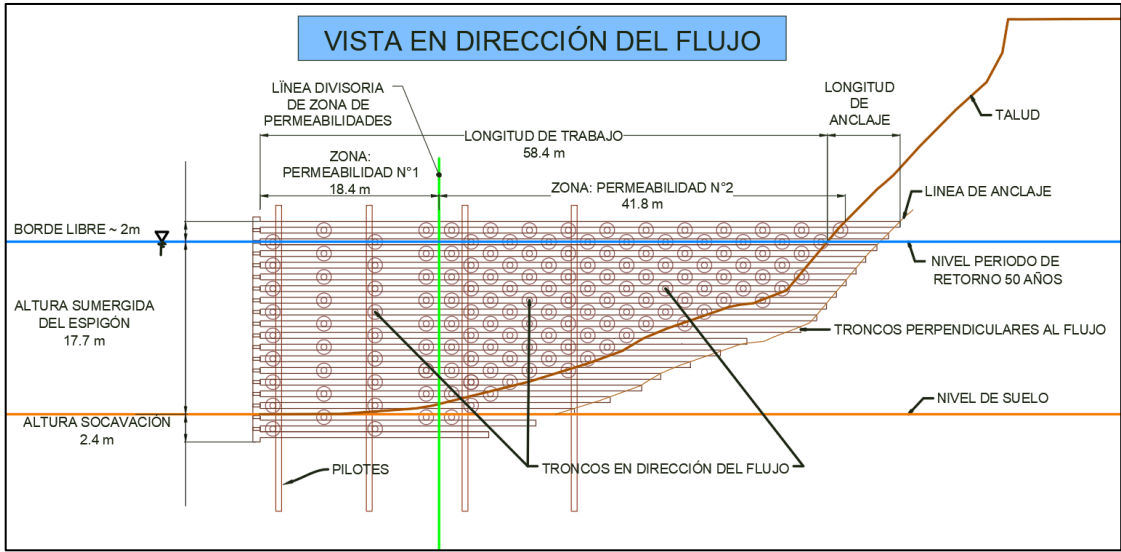


Figura 3.17. Geometría del Espigón en Dirección del flujo.

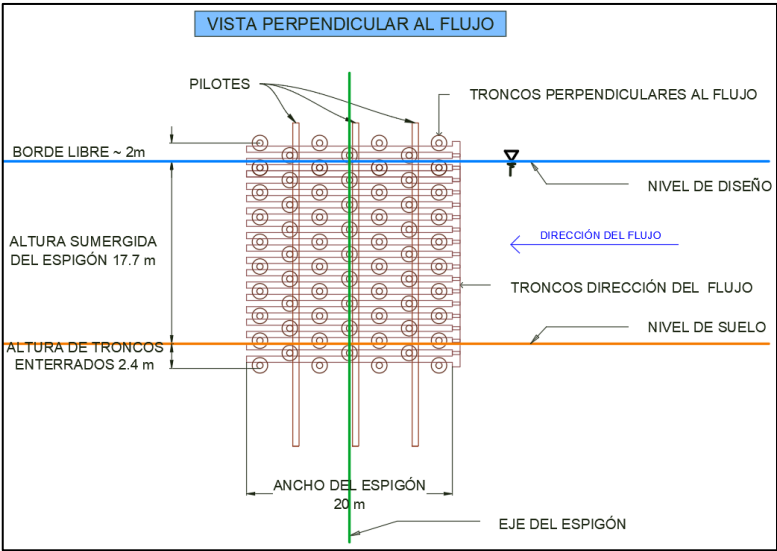


Figura 3.18. Geometría del Espigón en Dirección perpendicular al flujo.

La cantidad de troncos en dirección al flujo es de 130 y perpendicular al flujo de 67, ambas con fajo de raíz. Podemos observar en las figuras anteriores que debido a la geometría del espigón vamos a tener troncos que estén sumergidos, parcialmente sumergidos y secos, estos posteriormente se calcularán de forma separada. El área del espigón perpendicular al flujo que sirve para el cálculo de fuerzas de arrastre y sustentación es de 473.351 m². El número de pilotes usados dependerá del cálculo de estabilidad. Las características de la madera empleada son las siguientes.

Tabla 3.8. Propiedades de la madera utilizada en el diseño.

Propiedad	Valor
Densidad Básica	0.76 gr/cm ³
Diámetro de la Troza -	0.6 m
Diámetro Promedio del fajo de Raíz	1.5 m
Longitud Promedio del Fajo de Raíz	0.75 m
Proporción de Vacíos en el fajo de Raíz	0.5

Tabla 3.9. Características hidráulicas y del suelo.

Característica	Valor	Característica	Valor
Velocidad en el diseño Q en la parte exterior de la curva	3.2 m/s	Prof, aguas arriba de la estructura	17.7 m
Ancho en el diseño Q	320.0 m	Prof, aguas abajo de la estructura	17.7 m
Profundidad promedio en el diseño	17.7 m	Área de la estructura aguas arriba sumergida.	729.9 m ²
Área del flujo	5664.0 m ²	Área de la estructura aguas abajo sumergida.	729.9 m ²
Velocidad del flujo cuando la sección esta obstruida	3.5 m/s	Diámetro del material del talud	0.2 mm
Diámetro del material del lecho (d50)	0.2 mm		

Conociendo la geometría del espigón podemos calcular la cantidad de material de relleno en el empotramiento para su futuro cálculo. De la siguiente tabla podemos obtener un volumen de relleno seco de 65 m³ y un volumen de relleno sumergido de 419 m³.

Tabla 3.10. Metrado del material de relleno en el talud.

# Capa	Condición	Diámetro (m)	Área tronco (m ²)	# troncos	Long. Empotrada	Área	Volumen (m ³)	D subi	D dryi
1	Sumergido	0.6	0.28	4	13.91	22.2	53.4	4.2	0
3	Sumergido	0.6	0.28	3	17.02	20.0	35.9	4.2	0
5	Sumergido	0.6	0.28	4	15.41	18.1	43.3	4.7	0
7	Sumergido	0.6	0.28	3	12.72	14.6	26.2	4.34	0
9	Sumergido	0.6	0.28	4	11.9	14.3	34.3	4.23	0
11	Sumergido	0.6	0.28	3	11.48	15.0	26.9	4.11	0
13	Sumergido	0.6	0.28	4	11.64	15.0	36.1	3.52	0
15	Sumergido	0.6	0.28	3	14.73	19.1	34.3	5.4	0
17	Sumergido	0.6	0.28	4	13.1	14.7	35.3	6.23	0
19	Sumergido	0.6	0.28	3	10.63	10.1	18.1	6.21	0
21	Sumergido	0.6	0.28	4	7	8.2	19.7	5.12	1.09
23	Sumergido	0.6	0.28	3	5.73	8.0	14.4	3.92	2.16
25	Sumergido	0.6	0.28	4	5.73	8.0	19.3	2.72	3.18
27	Sumergido	0.6	0.28	3	5.73	8.0	14.5	1.52	4.2
29	Sumergido	0.6	0.28	4	5.86	3.1	7.3	0.32	5.35
31	seco	0.6	0.28	3	6.05	15.5	27.8	0	5.5
33	seco	0.6	0.28	4	6.23	15.5	37.2	0	5.49

De la misma forma podemos calcular el volumen de material de madera sumergida, parcialmente sumergida y sumergida con sus respectivos fajos de raíces. Para el cálculo del volumen de raíces en necesario el dato de proporción de vacíos.

Tabla 3.11. Metrado de troncos y raíces.

Condición		Metrado Troncos	Metrados Raíces	
		Volumen (m³)	Volumen (m³)	Vol (1-p)
secos	# Troncos Perp	9.27752	4.63	118.6
	# Troncos. D.flujo	15.9043	7.95	67.9
P. Sumergidos	volumen seco	7.95216	3.97	34.0
	volumen sumergido	7.95216	3.97	33.9
Sumergidos	# Troncos Perp	70.244	35.12	611.4
	# Troncos. D.flujo	140.488	70.24	599.4

3.2.5.2. Cálculo de la flotabilidad:

Para el cálculo de flotabilidad según la tabla 3.7 para un riesgo Alto-Moderado obtenemos un coeficiente de 1.75. Un signo negativo de los resultados indicara que la estructura está flotando. También agregamos que la estructura en el cálculo se considera como un todo y no en diferentes partes individuales de troncos.

A. Calculo de la resultante entre el empuje de la estructura y su peso:

Se tienen los siguientes datos tomados de la tabla 3.9 y 3.11 de la tabla:

- Volumen de Troncos y Raíces Sumergidos (m³) = 1316.16
- Volumen sumergido de Troncos y raíces parcialmente sumergidos (m³) = 37.97
- Volumen seco de Troncos y raíces parcialmente sumergidos (m³) = 37.97
- Volumen de troncos y raíces Secos(m³) = 199.08
- Peso Específico del Agua (N/m³) = 9810
- Peso Específico de la Madera usada = 0.76 gr/cm³ = 7453.054 N/m³

Fuerza de Flotación en madera sumergida:

$$F_{LWMS} = V_{LWMS} * (\gamma_{wood} - \gamma_w) \quad \dots (1)$$

$$F_{LWMS} = 1316 * (7453 - 9810)$$

$$F_{LWMS} = - 3101812 \text{ N}$$

Fuerza de Flotación en madera sumergida de la madera parcialmente sumergida:

$$F_{LWMS} = V_{LWMS} * (\gamma_{wood} - \gamma_w) \quad \dots (2)$$

$$F_{LWMS} = 37.97 * (7453 - 9810)$$

$$F_{LWMS} = - 86495.29 \text{ N}$$

Fuerza de Flotación en madera seca de la madera parcialmente sumergida:

$$F_{LWMD} = V_{LWMD} * \gamma_{wood} \quad \dots (3)$$

$$F_{LWMD} = 37.97 * 7453$$

$$F_{LWMD} = 282990.41 \text{ N}$$

Fuerza de Flotación en madera seca:

$$F_{LWMD} = V_{LWMD} * \gamma_{wood} \quad \dots (4)$$

$$F_{LWMD} = 199.08 * 7453$$

$$F_{LWMD} = 1483743.24 \text{ N}$$

B. Calculo de las Fuerzas de Sustentación (Lift):

Para el cálculo de la fuerza de sustentación es necesario conocer el coeficiente lift. Con respecto a esto Douglas Shields recomienda que en ausencia de mejores datos el coeficiente se asume 1 y para estructuras que no están completamente sumergidas se puede considerar 0, mientras que Knutson y Fealko manifiesta que el coeficiente lift siempre es pequeño y varía desde 0.1 a 0.2 (0.18 para cilindros con un máximo aproximado de 0.45). Alonso 2004 nos dice que las fuerzas de sustentación son mayores cuando la madera está en contacto con el lecho y declina hasta cero cuando el espacio entre el fondo del canal y el lecho excede la mitad del diámetro del tronco.

Datos:

- Ingresar Coeficiente lift $C_L = 0.18$
- Área Perpendicular al Flujo (m^2) = 473.351
- Velocidad Aguas arriba para el periodo de diseño (m/s) = 3.2
- Aceleración de la gravedad (m/s) = 9.80665

$$F_L = - \frac{C_L * A_{LWM} * \gamma_w * U_0^2}{2 * g} \quad \dots (5)$$

$$F_L = - \frac{0.18 * 473.351 * 9810 * 3.2^2}{2 * 9.80665}$$

$$F_L = - 436389.303 \text{ N}$$

C. Calculo del peso del Relleno del Empotramiento:

Al estar empotrada la estructura los troncos empotrados soportan el peso del material del talud por encima de ellos, en nuestro caso tenemos un total de 67 troncos empotrados. Los datos necesarios son para el cálculo son los siguientes:

- Volumen de Suelo Sumergido (m^3) = 419.00
- Volumen del Suelo Seco (m^3) = 65.00
- Sg rock = 2.65
- Peso Específico del Suelo usado como relleno γ_{soil} (N/m^3) = 14609.17

$$F_{soil} = \sum_i^n V_{soilsub\ i} * \gamma'_{soil} + V_{soildry\ i} * \gamma_{soil} \quad \dots (6)$$

Como primer paso es necesario calcular el γ'_{soil} que es desconocido por el momento y es la diferencia entre el peso específico saturado del material y el peso específico del agua:

$$\gamma'_{soil} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$e = \frac{SG_{rock} * \gamma_w}{\gamma_{soil}} - 1 = \frac{2.65 * 9810}{14609.17} - 1 = 0.779$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(SG_{rock} + e) * \gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.65 + 0.779) * 9810}{1 + 0.779} = 18911 \text{ N/m}^3$$

Reemplazando:

$$\gamma'_{soil} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$\gamma'_{soil} = 18911 - 9810 = 9101.21 \text{ N/m}^3$$

Finalmente reemplazando todos los datos en la ecuación 6:

$$F_{soil} = V_{soilsub\ i} * \gamma'_{soil} + V_{soildry\ i} * \gamma_{soil} \quad \dots (7)$$

$$F_{soil} = 419 * 9101.21 + 65 * 14609.17$$

$$F_{soil} = 4763004.115 \text{ N}$$

D. Cálculo del Peso del Lastre:

Como es conocido las estructuras de madera tienden a flotar por lo tanto suele ser necesario agregar un peso extra llamado lastre. Este lastre no debe irrumpir, en nuestro caso, con la permeabilidad asignada. La geometría de este espigón requiere de pilotes para soportar las solicitaciones, en otras situaciones quizás el uso de estas dos técnicas a la vez no sería necesario. El tipo de material requerido dependerá de la disponibilidad de este material en la zona. Podemos agregar que para esta gran estructura de madera el tipo de material usado y la forma de emplearlo sin alterar la permeabilidad aún no ha sido solucionado, pero para ejemplificar el cálculo se presenta lo siguiente:

Datos necesarios:

- Volumen de Lastre sumergido = 150
- Volumen de Lastre seco = 50
- Peso específico del Material (médium sand) (N/m³) = 14766.25536

$$F_{boulder} = F_{bouldersub} + F_{boulderdry} \quad \dots (8)$$

$$F_{bouldersub} = Volumen_{sub} * (\gamma_{boulder} - \gamma_w)$$

$$F_{bouldersub} = 150 * (14766.25 - 9810) = 743437.5 \text{ N}$$

$$F_{boulderdry} = Volumen_{dry} * (\gamma_{boulder})$$

$$F_{boulderdry} = 50 * (14766.25) = 738312.5 \text{ N}$$

Finalmente Reemplazando: $F_{boulder} = 743437.5 + 738312.5 = 1481750 \text{ N}$

E. Cálculo de la resultante de las Fuerzas Verticales:

La suma de estas fuerzas indicará si la estructura está flotando o no, si lo estuviera sería necesario agregar mayor lastre o recurrir a Pilotes. La solución de esta interrogante corresponderá al diseñador.

$$F_b = F_{LWMs} + F_{LWMd} + F_L + F_{boulder} + F_{soil} \quad \dots (9)$$

$$F_b = F_{LWMs} + F_{LWMd} + F_L + F_{boulder} + F_{soil} \quad \dots (9)$$

$$F_b = (1483743.24 \text{ N} + 282990.41 \text{ N}) - (86495.29 \text{ N} + 3101812 \text{ N}) - 436389.303 \text{ N} \\ + 1481750 \text{ N} + 4763004.115 \text{ N}$$

$$F_b = 4386791.172 \text{ N}$$

Como se aprecia el cálculo de las fuerzas resulta positivo indicando que la estructura es estable; no obstante, el espigón no solo está soportando cargas verticales sino también Horizontales. Por lo tanto, se requerirá agregar pilotes.

F. Cálculo de la fricción de Piel de Pilotes:

Los pilotes ayudan a mantener estable verticalmente a la estructura mediante el fuste. Para hallar esta resistencia se requiere los siguientes datos:

- Peso Específico del Suelo del Lecho = 14609.16754
- Ángulo de fricción interna = 30
- Ingresar Coeficiente de Presión lateral de tierra (Ks) = 1.5
- Peso Específico de la madera usada = 7453.054
- Diámetro de Pilotes (m) = 0.6
- Ingresar Longitud de Empotramiento de los pilotes (m) = 12
- Ingresar Número de Pilotes = 15

$$F_{piles-v} = N_{piles} * \pi * d_{piles} * L_{piles} \left(K_s * \tan \frac{2}{3} \phi * \sigma' + \frac{d_{piles}}{4} * (\gamma_{wood} - \gamma_w) \right) \dots (10)$$

Primer paso: Hallar el peso específico saturado del suelo:

$$e = \frac{SG_{rock} * \gamma_w}{\gamma_{soil}} - 1 = \frac{2.65 * 9810}{14609.16754} - 1 = 0.779$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(SG_{rock} + e) * \gamma_w}{1 + e} = \frac{(2.65 + 0.779) * 9810}{1 + 0.779} = 18908.65 \text{ N}$$

Segundo paso:

$$\sigma' = L_{piles} * (\gamma_{sat} - \gamma_w) = 12 * (18908.65 - 9810) = 109183.811 \text{ N}$$

Tercer paso: reemplazar todos los datos en la ecuación 10:

$$F_{piles-v} = N_{piles} * \pi * d_{piles} * L_{piles} \left(K_s * \tan \frac{2}{3} \phi * \sigma' + \frac{d_{piles}}{4} * (\gamma_{wood} - \gamma_w) \right) \dots (10)$$

$$F_{piles-v} = 15 * \pi * 0.6$$

$$* 12 \left(1.5 * \frac{\tan 2}{3} \left(30 * \frac{\pi}{180} \right) * (109183.811) + \frac{0.6}{4} * (7453.054 - 9810) \right)$$

$$= 20105068.14 \text{ N}$$

G. Cálculo de la resultante Fuerzas verticales:

Finalmente, el cálculo de las fuerzas verticales incluyendo la fricción de piel de los pilotes será:

$$F_b = F_{LWMs} + F_{LWMd} + F_L + F_{boulder} + F_{soil} + F_{piles-v} \dots (11)$$

$$F_b = 4386791.172 \text{ N} + 20105068.14 \text{ N} = 24491859.31 \text{ N}$$

La estructura obtiene un significativo aporte de estabilidad vertical cuando se le agrega pilotes.

H. Cálculo del factor de seguridad:

Es la suma de todas las fuerzas positivas divididas por el valor absoluto de la suma de todas las fuerzas negativas como se aprecia en la Ecuación. Si el valor calculado es menor que el coeficiente dado en la tabla anterior deberíamos plantearnos agregar lastre o adicionar pilotes para mantener estable de forma conservadora al espigón.

$$FOS_b = \frac{F_{LWMd} + F_{boulders} + F_{soil} + F_{piles-v}}{|F_{LWMs} + F_L|}$$

$$FOS_b = \frac{(1483743.24 + 282990.41) + 1481750 + 4763004.115 + 20105068.14}{|-86495.29 - 3101812 - 436389.303|}$$

$$FOS_b = 7.75$$

El valor del factor de seguridad para flotación resulta ser mucho mayor que el requerido que es 2. Por lo tanto, la estructura no debería tener problemas de flotación.

3.2.5.3. Balance de fuerzas horizontales - resistencia al deslizamiento:

A. Cálculo de la Fuerza de Arrastre

La fuerza de arrastre actúa sobre los troncos y depende de la velocidad del flujo y del área donde actúa. Las fuerzas de arrastre pueden aumentar con la retención de escombros así que se debe tomar con criterio el área con la cual se irá a calcular. Los datos requeridos son:

- Área de la sección del Río (m²) = 5664
- Ingresar Área Húmeda Perpendicular al Flujo (m²) = 473.351
- Ingresar Velocidad en la sección reducida "V_c"(m/s) = 4
- Profundidad Prom. Del flujo en la contracción del flujo "Y_c" = 17.7
- Aceleración de la gravedad (m/s) = 9.80665

Para usar las tablas citadas por knutson y Fealko de Parola (2000) para hallar el coeficiente de arrastre necesitamos calcular la tasa de obstrucción "B" y el Froude:

$$B = \frac{A_b}{A_b + A_c} = \frac{473.351}{5664} = 0.08$$
$$Fr_c = \frac{V_c}{\sqrt{g * Y_c}} = \frac{4}{\sqrt{9.80665 * 17.7}} = 0.303$$

Buscando el valor del Cd en la siguiente tabla obtenemos:

Cd =	SI
1.8	B < 0.36 y Fr _c < 0.4

Para hallar la fuerza de arrastre usamos la siguiente fórmula:

$$F_d = \frac{C_D * A_{LWM} * \gamma_w * U_c^2}{2 * g} \quad \dots (12)$$
$$F_d = \frac{1.8 * 473.351 * 9810 * 4^2}{2 * g} = 6818687.16 \text{ N}$$

B. Fuerzas Hidrostáticas

Las estructuras de maderas que se usan como protección de ríos al estar sumergidos son afectadas por la presión hidrostática. La diferencia entre presiones hidrostáticas aguas arriba y aguas abajo en esta estructura no es relevante debido a una muy mínima diferencia de tirantes entre ellas. Por lo tanto, el cálculo podría obviarse; no obstante, en nuestro caso será mostrado con fines didácticos.

El área sin considerar la permeabilidad será considerada como el área donde actúan las fuerzas hidrostáticas en este caso igual a 729 m².

$$F_{hu} = -\frac{1}{2} * \gamma_w * Y_u * A_u \quad \dots (13)$$
$$F_{hu} = \frac{1}{2} * 9810 * 17.7 * 729.9 = 63290686.5 \text{ N}$$
$$F_{hd} = \frac{1}{2} * \gamma_w * Y_d * A_d \quad \dots (14)$$
$$F_{hd} = -\frac{1}{2} * 9810 * 17.7 * 729.9 = -63290686.5 \text{ N}$$

C. Fuerzas de Impacto

Estas fuerzas son producidas por el impacto de los troncos que trae la corriente, la ecuación empleada ha sido definida por ASCE en el 2006 según indica Knutson y Fealko. Los coeficientes empleados en el cálculo de estas fuerzas requieren de mayores estudios para poder ser aplicados con mayor seguridad en nuestro país; por lo tanto los valores asumidos fueron conservadores. Podemos agregar que Existen algunos autores que no las consideran en su análisis de estabilidad.

- $C_i = \text{Coeficiente de Importancia} = 1$
- $C_o = \text{Coeficiente de orientación} = 0.8$
- $C_d = \text{Coeficiente de de profundidad}$ (máximo valor del gráfico) = 1
- $C_b = \text{Coeficiente de bloqueo}$ (máximo valor del gráfico) = 1
- $R_{max} = \text{Promedio de respuesta para cargas de impulso} = 0.8$
- Peso de escombros de madera (Información del tesista del estudio de transporte de palos) = 2000 kg
- Velocidad en la superficie del canal (m/s) = 3.2
- Variación de tiempo (s) = 0.03 (De acuerdo con ASCE 7-05 la recomendación es un intervalo de impacto de 0.03 segundos.)

$$F_i = \frac{\pi * W_{debris} * V_{channel} * C_i * C_o * C_d * C_b * R_{max}}{2 * g * \Delta t} \dots (15)$$

Reemplazando: $F_i = \frac{\pi * 2000 * 3.2 * 1 * 0.8 * 1 * 0.8}{2 * 9.8065 * 0.03} = 21869.786 \text{ N}$

D. Cálculo de la Fuerza de Fricción:

Para el cálculo de la fuerza se usa la fuerza resultante de fuerzas verticales sin considerar el aporte de los pilotes. Mientras la estructura no flote existirá esta fuerza.

- Coeficiente de Fricción : $\mu_{bed} = 0.577$
- Fuerza Vertical del análisis de flotabilidad sin La fuerza de Pilotes = 4386791.172 N

$$F_f = -\mu_{bed} * (F_b - F_{piles-v}) \dots (16)$$

$$F_f = -0.577 * (4386791.172) = -2531178.506 \text{ N}$$

E. Cálculo de las fuerzas Pasivas:

Al estar empotrado el espigón recibirá fuerzas pasivas sobre el área de cada tronco anclado, estas fuerzas ayudarán a mantener una estabilidad estructural horizontal. Para su cálculo requiere del metrado de la longitud del tronco empotrado; y su altura por encima de este tronco, sumergida o no sumergida cual fuera su caso. La fórmula (17) se empleará para cada tronco como se aprecia en la tabla 3.12 y se necesitaran los siguientes datos:

- Ángulo de fricción interna del relleno: $\phi = 30$
- K_p del tipo de material usado como relleno : $K_p = \frac{1 + \text{Sen } \phi}{1 - \text{Sen } \phi} = \frac{1 + 0.5}{1 - 0.5} = 3$
- γ_{sat} (N/m³) = 18906.27 (Se calculó en el análisis del relleno de empotramiento)
- γ_{soil} (N/m³) = 14609.17
- Diámetro del Leño = 0.60

$$F_{passive} = -0.5 * K_p * \sum_i^n \sigma_{v_i} * L_{em_i} * d_{log_i} \dots (17)$$

Donde:

$$\sigma_{v_i} = D_{sub_i} * (\gamma_{sat} - \gamma_{water}) + D_{dry_i} * \gamma_{soil}$$

Fuerza total Pasiva (ver tabla 3.12): 18573881.8 N

Tabla 3.12. Calculo de fuerzas pasivas en cada tronco anclado al talud.

Capa	#Troncos	D _{subi}	D _{dryi}	Long (m) Empotrada	D _{Subi} * ($\gamma_{sat} - \gamma_{water}$)	D _{dryi} * γ_{soil}	σ_{vi}	Fuerza pasiva
1	4.0	4.2	0.0	13.9	38204.4	0.0	38204.4	1275414.1
3	3.0	4.2	0.0	17.0	38204.4	0.0	38204.4	1170428.5
5	4.0	4.7	0.0	15.4	42752.5	0.0	42752.5	1581158.0
7	3.0	4.3	0.0	12.7	39477.8	0.0	39477.8	903884.4
9	4.0	4.2	0.0	11.9	38477.2	0.0	38477.2	1098910.0
11	3.0	4.1	0.0	11.5	37385.7	0.0	37385.7	772537.8
13	4.0	3.5	0.0	11.6	32018.9	0.0	32018.9	894479.6
15	3.0	5.4	0.0	14.7	49119.9	0.0	49119.9	1302364.5
17	4.0	6.2	0.0	13.1	56669.8	0.0	56669.8	1781698.1
19	3.0	6.2	0.0	10.6	56487.9	0.0	56487.9	1080838.8
21	4.0	5.1	1.1	7.0	46572.9	15924.0	62496.9	1049948.2
23	3.0	3.9	2.2	5.7	35657.4	31555.8	67213.2	693236.9
25	4.0	2.7	3.2	5.7	24741.9	46457.2	71199.0	979128.9
27	3.0	1.5	4.2	5.7	13826.3	61358.5	75184.8	775456.4
29	4.0	0.3	5.4	5.9	2910.8	78159.0	81069.9	1140166.4
31	3.0	0.0	5.5	6.1	0.0	80350.4	80350.4	875016.1
33	4.0	0.0	5.5	6.2	0.0	80204.3	80204.3	1199215.1
Cálculo de fuerza Total Pasiva								18573881.8

F. Calculo de la resistencia lateral de pilotes:

La resistencia lateral de pilotes requiere de los siguientes datos:

- Número de Pilotes Instalados = 15
- Diámetro de Pilotes (m) = 0.6
- Longitud de Empotramiento de los pilotes (m) = 12
- Altura por encima de la profundidad de erosión potencial de la carga h load (m) = 3
- Peso Específico del Suelo del Lecho = 14609.16754
- Ángulo de fricción interna = 30

Primer paso cálculo del Peso Unitario efectivo:

$$\gamma_e = \gamma_s - \gamma_w = 14609.16754 - 9810 = 4799.167541$$

Segundo paso: Coeficiente de Presión lateral de tierra (Kp)

$$K_p = \frac{1 + \text{Sen } \phi}{1 - \text{Sen } \phi} = \frac{1 + 0.5}{1 - 0.5} = 3$$

Remplazando:

$$F_{piles-h} = -N_{piles} * \frac{L_{pile}^3 * \frac{1}{2} * \gamma_e * d_{pile} * K_p}{h_{load} + L_{pile}} \quad \dots (18)$$

$$F_{piles-h} = -15 * \frac{12^3 * \frac{1}{2} * 4799.16 * 0.6 * 3}{3 + 12} = -7463653.63 \text{ N}$$

G. Cálculo de las fuerzas resultantes horizontales:

La suma de todas las fuerzas horizontales aplicadas nos indicara si el espigón se deslizara ante las fuerzas motrices, para tal efecto un valor negativo dirá que no inestable y uno positivo que si:

$$F_{sliding} = F_{hd} + F_f + F_{piles-h} + F_{passive} + F_d + F_{hu} + F_i \dots (19)$$

$$F_{sliding} = -63290686.5 - 2531178.506 - 7463653.63 - 18573881.85 + 6818687.16 + 63290686.5 + 21869.786 = -21728157.04 \text{ N}$$

H. Cálculo del factor de deslizamiento:

Finalmente realizamos el cálculo del valor de deslizamiento, dividiendo las fuerzas resistentes entre las fuerzas motrices, con la siguiente ecuación:

$$FOS_{sliding} = \frac{|F_{hd} + F_f + F_{piles-h} + F_{passive}|}{F_d + F_{hu} + F_i} \dots (20)$$

$$FOS_{sliding} = \frac{|-63290686.5 - 2531178.506 - 7463653.63 - 18573881.85|}{6818687.16 + 63290686.5 + 21869.786} = 1.309$$

Como se aprecia el factor de deslizamiento es menor que el valor recomendado de las tablas dadas por Knutson y Fealko que es 1.75. La estructura es estable, pero bajo un enfoque conservador comparada con las tablas mencionadas, no lo es. Queda por lo tanto a juicio de quien diseña continuar con el análisis de estabilidad o agregar algún tipo de lastre o pilotes (profundidad de pilote).

3.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

3.3.1. Ubicación del Modelo Físico

La etapa de procedimiento experimental se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) “Alfonso Alcedán La Cruz” de la Universidad Nacional de Ingeniería con dirección en la Av. Túpac Amaru 210 - Lima 25 - Rímac - Lima - Perú. El LNH cuenta con un área total de 15762.742 m² de la cual se dispone de un área de aproximadamente 7000 m² para pruebas experimentales en modelo físico al aire libre. En esta última, por sus dimensiones, se ubicó el modelo físico de la Pastora.

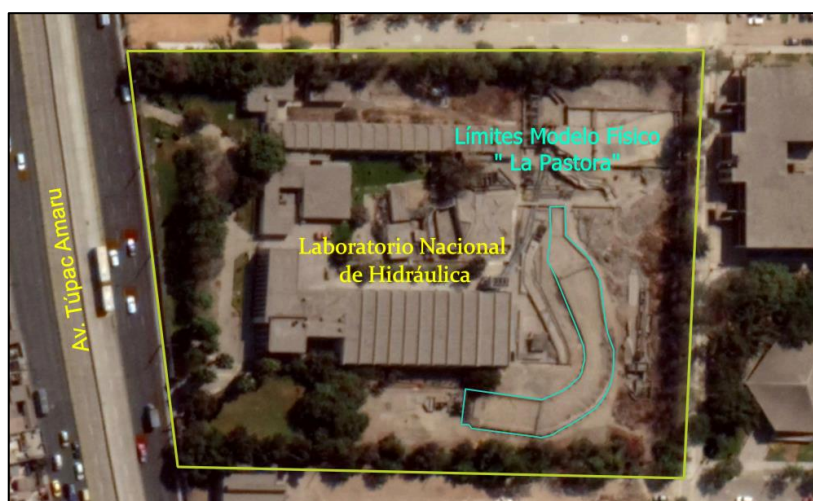


Figura 3.19. Ubicación del modelo experimental.

El modelo físico llamado “La Pastora” fue construido por Odebrecht Latinvest Operaciones y Mantenimiento S.A.C cuando contrato el servicio del LNH para estudiar las diversas alternativas de solución al problema de erosión acelerada en el tramo del Río Madre de Dios que ponía en riesgo el tramo de la carretera Interoceánica Sur. De dicho estudio quedaron las estructuras del modelo que sería empleado para el estudio de los espigones fabricados con troncos de árboles de la presente tesis. Por lo tanto, se mantuvieron las características del modelo físico y de las que se describirá en el siguiente título.

3.3.2. Descripción del Prototipo

Los estudios básicos que se realizaron para el diseño de los espigones fueron detallados en el capítulo N°3 de esta tesis. De estos estudios se concluyó que el material del lecho tiene un $d_{50} = 0.2$ mm. La margen del río izquierda se caracteriza por ser una llanura de inundación con cotas de 168.36 msnm y la margen derecha posee taludes con una elevación de 205.44 msnm. Los tipos de suelos encontrados en el tramo del río denominado la Pastora son clasificados según SUCS del tipo arenoso SP en la margen izquierda y del tipo arena limosa de grano fino SM en la margen derecha. La pendiente de la superficie de agua promedio en el periodo de mediciones en estiaje varió de 2.1×10^{-5} a 6.2×10^{-5} . El ancho superficial del río en el tramo de estudio en épocas de estiaje es de aproximadamente 250 m y en épocas de máximas avenidas de 430 m. Del análisis hidrológico se obtuvo caudales para un periodo de retorno de 2.2 años de 8003 m³/s y para un periodo de retorno de 50 años de 14341 m³/s.

La topografía del cauce nos muestra el alineamiento del río que tiene una longitud de 4.38 km con tres tramos del cauce muy marcados. Al inicio empieza en un tramo recto con una extensión de 1.2 km, luego toma la forma curva en una longitud de 1.92 km para finalizar en un tramo recto de 1.26 km. Precisamente este alineamiento y las secciones transversales a 20 m que se obtuvieron de este, servirían posteriormente para trasladar la topografía de prototipo a modelo.

Durante los ensayos de alternativa de solución realizados por la empresa Odebrecht, se realizó un estudio hidráulico del tramo del río madre de Dios usando el software de modelamiento numérico River 2D. Sobre Los datos obtenidos de esta simulación (sin estructuras) se establecieron 5 BM, un punto A y un punto C1 que luego servirían para calibrar el modelo físico (ver Figura 3.20).

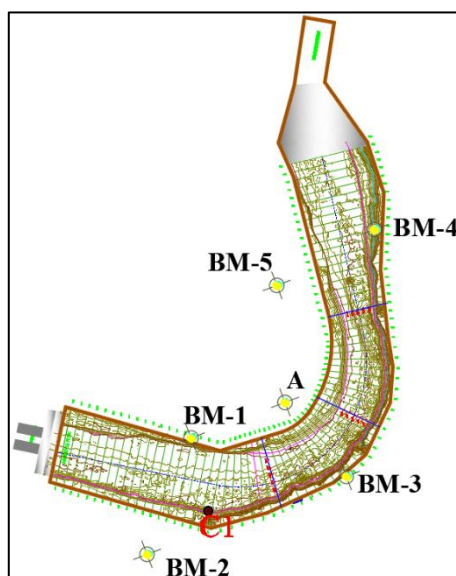


Figura 3.20. Límites del prototipo y Localización de puntos para calibración.

La ubicación y cota de estos puntos en prototipo (ver Tabla 3.13) fueron utilizados para trasladar la batimetría de la pastora al modelo físico. Además, el punto C1 serviría para controlar el nivel de tirante de agua para cada caudal establecido en prototipo (ver Tabla 3.14).

Tabla 3.13. Coordenadas de puntos geométricos de calibración. Fuente: Defensas Ribereñas - Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

PUNTO	COTA (msnm.)	ESTE (m.)	NORTE (m.)
BM5	203.351	476142.85	8610217.06
BM3	211.8594	476151.33	8610194.08
BM2	152.6531	476127.21	8610184.58
BM1	156.8913	476132.51	8610198.63
BM4	207.6125	476154.61	8610223.79
A	159.8313	477036.438	8609635.95
C1		476481	8608850

Tabla 3.14. Cotas del Punto C1 en prototipo. Fuente: Defensas Ribereñas - Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Q (m ³ /s)	Cota (msnm)
1399	170.93
4953	174.59
7071	176.39
8003	177.05
12997	180.23
14341	181.31

El proceso de diseño de los espigones se realizó en prototipo utilizando los datos de los estudios básicos mencionados en el capítulo anterior. Este proceso consideró un periodo de retorno de 50 años

que supone un caudal de 14341 m³/s. El resultado del diseño se plasma en una distribución geométrica de espigones sobre un cauce (alternativa de diseño) que pretende ser testada.

Las características geométricas de cada alternativa de diseño son explicadas en el capítulo 6. En esta tesis, cada alternativa de diseño en prototipo es mejorada a partir del análisis de resultados de ensayos experimentales de una anterior. El número de alternativas de diseño fueron 3 que estuvieron supeditadas principalmente al presupuesto y plazos establecidos para este proyecto. Así mismo, en el modelo físico solo se pondrá a prueba los esquemas de diseño de los espigones mas no su estabilidad.

3.3.3. Análisis Dimensional y Proporción de escalas

Los estudios sobre la respuesta de un canal frente al desarrollo de situaciones complejas se hacen generalmente usando un modelo físico. Este sistema semejante reducido está diseñado para lograr un comportamiento similar al prototipo. La relación de los procesos y parámetros físicos que gobiernan debe ser de la misma para modelo y prototipo (Richardson et. al, 2001), esto quiere decir, deben ser mecánicamente similares, tanto en similitud geométrica, cinemática, dinámica, y similitudes relacionadas con los sedimentos.

Las pruebas de eficiencia de diseño acerca de la predicción del comportamiento de estructuras hidráulicas en un río, propuestas pueden hacerse a costos moderados y pequeños riesgos en modelos de pequeña escala (Rocha, 1998). Del mismo modo, la interacción de una estructura y el medio ambiente del río se pueden estudiar en detalle. La similitud requerida entre un prototipo y un modelo implica dos condiciones (Richardson et. al, 2001):

- A cada punto, tiempo y proceso en el prototipo, existe un punto, un tiempo y un proceso coordinados de manera única en el modelo.
- Las relaciones de magnitudes físicas correspondientes entre el prototipo y el modelo son constantes para cada tipo de cantidad física.

Tabla 3.15. Variables utilizadas en el análisis dimensional.

Símbolo	Descripción de la Variable
A_F	Área frontal del espigón con respecto a la dirección del flujo
H	Altura del espigón relativo al tirante de agua
α	Ángulo de orientación del espigón con respecto a la dirección del
k	Rugosidad superficial del espigón
η	Porosidad del espigón
v	Velocidad del flujo
ρ	Densidad del flujo
μ	Viscosidad dinámica del flujo
δ	Tensión Superficial
g	Gravedad
L	Longitud característica del espigón

Los experimentos realizados están dirigidos a verificar el comportamiento hidráulico de los espigones diseñados para el tramo la pastora. Para tal efecto, es necesario cuantificar la respuesta morfodinámica del canal y el cambio en la dinámica del fluido.

El procedimiento de modelamiento físico realizado se basa en la teoría de similitud hidráulica y análisis dimensional. El análisis dimensional comienza con la identificación de las variables correctas que participan en el fenómeno físico estudiado (ver Tabla 3.15). Luego se empleó el teorema de π Buckingham para reunirlos en forma adimensional, reduciendo el número de pruebas a efectuar.

En el presente caso, las 11 variables (ver Tabla 3.15) abarca 3 dimensiones (Masa M, Longitud L, Tiempo T) con la conducción de 9 parámetros adimensionales posibles. Siete de ellas tienen

características de fenómenos generales en flujo de canal abiertos (presión, velocidad de flujo, escala de longitud, densidad del fluido, viscosidad del fluido, tensión superficial del fluido y gravedad). Donde se considera que la altura del espigón (H) es mayor en magnitud que la altura de agua y la funcionalidad del espigón es tener flexibilidad para justificar la omisión del módulo de Young. A continuación, los parámetros adimensionales que se incluyeron para el estudio son:

$$f\left[Fr, Re, We, \frac{k}{L}, \alpha, \eta\right] = 0 \quad (4.1)$$

$$f\left[\frac{v}{\sqrt{gL}}, \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{\rho v^2 L}{\delta}, \frac{k}{L}, \alpha, \eta\right] = 0 \quad (4.2)$$

Asimismo, los efectos de la tensión superficial y fuerzas viscosas pueden ser no considerados cuando el tirante de agua del modelo supera los 0.015 metros y el flujo presenta un régimen turbulento, ya que el modelo físico cumple estas consideraciones por su magnitud, reduciendo a cuatro parámetros adimensionales.

$$f\left[Fr, \frac{k}{L}, \alpha, \eta\right] = 0 \quad (4.3)$$

El parámetro adimensional como el número de Froude escala según la ecuación:

$$Fr_r = \frac{Fr_p}{Fr_m} = \frac{v_r}{\sqrt{g_r L_r}} = \frac{v_r}{\sqrt{L_r}} = 1 \quad (4.4)$$

Como condición de similitud para el modelo físico se utilizará la condición del número de Froude, por ello deben tener el mismo número de Froude el prototipo y modelo para el estudio experimental. Adicionalmente, a partir del factor de escala por longitud “ λ ” se derivan las siguientes relaciones. (ver Tabla 3.16).

Tabla 3.16. Relaciones asociadas entre el modelo y el prototipo para diferentes magnitudes.

Magnitud	Símbolo
Longitud	$L_p/L_m = \lambda$
Velocidad	$V_p/V_m = \lambda^{0.5}$
Tiempo	$T_p/T_m = \lambda^{0.5}$
Caudales	$Q_p/Q_m = \lambda^{2.5}$
Rugosidad	$\eta_p/\eta_m = \lambda^{0.166}$

Con el modelo físico se pretende observar los cambios en el comportamiento dinámico del tramo del río Madre de Dios con la presencia de los espigones fabricados con troncos de árboles de modo que se determine su eficiencia. De esta forma ha quedado excluida del estudio su estabilidad estructural y por consiguiente las fuerzas que participan de esta (Fuerza Lift, Fuerza de arrastre, Fuerzas Pasivas del Suelo, Peso del Empotramiento, Peso de la Estructura, Fuste de los pilotes, Fuerza de fricción y Momentos Actantes).

Del otro lado, es necesario modelar la geometría de cada elemento estructural del espigón a escala (troncos perpendiculares al flujo, troncos en dirección del flujo, pilotes e incluso fajo de raíces), mantener el grado de permeabilidad y el esquema de diseño propiamente dicho.

3.3.4. Diseño del Modelo Físico

Una vez asignada las relaciones entre modelo y prototipo, se debe elegir una escala adecuada para poder estudiar el fenómeno. En esta investigación estuvo sujeta a las condiciones del laboratorio Nacional de Hidráulica, tales como espacio disponible, capacidad de bombas instaladas, precisión de los instrumentos adquiridos. Además, debemos tener en cuenta que muchas veces una escala menor no nos permite apreciar con claridad el fenómeno estudiado y una escala mayor representaría un costo excesivo; siempre teniendo cuidado de los efectos de escala.

El modelo físico en estudio se estableció que fuera geoméricamente semejante (no distorsionado), es decir tuvo un único factor de escala de las magnitudes geométricas de $\lambda = 60$. Además, se determinó que fuera de contorno móvil para poder estudiar los cambios morfodinámicos.

Tabla 3.17. Valores numéricos de escalas del modelo.

Magnitud	Símbolo	Valor Numérico
Longitud	$L_p/L_m = \lambda$	60
Velocidad	$V_p/V_m = \lambda^{0.5}$	7.746
Tiempo	$T_p/T_m = \lambda^{0.5}$	7.746
Caudales	$Q_p/Q_m = \lambda^{2.5}$	27885.48
Rugosidad	$\eta_p/\eta_m = \lambda^{0.166}$	1.979

Los límites del modelo físico se establecieron ajustando la topografía y batimetría realizada para Odebrecht previamente escalados a 1/60, tratando de abordar toda la complejidad geométrica del fenómeno estudiado. La topografía y batimetría del río serían replanteadas usando los 5 BM y el Punto A (ver Tabla. 3.13). Se mantendría la semejanza geométrica de los ejes en prototipo y las secciones del río obtenidas a partir de este.

Cabe decir que sobre el modelo físico se pondrá a prueba los tres esquemas o alternativas de diseño sin evaluar el transporte de sedimentos. Por lo tanto, se utilizará agua clara durante su ejecución lo que ocasionará que las socavaciones que se presenten sean mayores.

Las dimensiones geométricas de estas alternativas y las de sus espigones son llevadas a modelo utilizando la escala geométrica. La implementación de estas alternativas se explica en el siguiente capítulo y su descripción geométrica en el capítulo 6. A partir de lo mencionado, en el siguiente título solo se explica el proceso de modelamiento del Tramo del Río Madre de Dios y no de las estructuras a evaluar.

3.3.4.1. Material de Lecho del modelo físico

Para el estudio mediante un modelo físico en lecho móvil, es necesario brindar la justificación del tipo material de fondo y según los estudios básicos de mecánica de suelos se puede caracterizar la composición del material de fondo en prototipo. Básicamente, el lecho del modelo físico represento material parecido en composición al prototipo y necesitara extraer materia de una cantera cercana al modelo.

El material de fondo móvil requirió el cálculo hidráulico con los parámetros hidráulicos característicos de la sección crítica del cauce como el tirante, pendiente, ancho superficial. Primeramente, para mantener el movimiento de partículas en cercanía del lecho se debe emplear la profundidad crítica para el arrastre de sedimentos para representar el movimiento de sedimentos en el modelo. Luego, la conversión del movimiento de partículas en un modelo físico requiere aligerar el material (disminuir el peso específico) y aumentar el diámetro (Ramon Fuentes, 2002). Asimismo, se dispone de diferentes materiales para la selección como la antracita, bakelita, poliuretano o acrílico, normalmente se utiliza materiales de fácil adquisición y cercanía de canteras para el modelo hidráulico.

Las características del río provenientes de los estudios básicos son:

- El ancho superficial promedio en estiaje varia aproximadamente entre 250 metros a 430 metros.
- La profundidad del río, en la zona del talweg, en épocas de estiaje, tiene un orden de magnitud que varía entre 10 metros a 15 metros.
- La pendiente media del cauce es de aproximadamente de $S = 0.00023$.
- Del análisis granulométrico del material superficial del cauce se tiene que el diámetro representativo (d_{50}) es 0.16 milímetros.
- La temperatura ambiental es 25°C y la viscosidad cinemática (ν) resulta $8.94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

El modelo físico necesita el grafico de Shields y la ecuación de esfuerzo crítico para calcular la profundidad critica de arrastre. (Fuentes,2002)

$$Y_{cr} = 0.081 \text{ metros} \quad (4.5)$$

Se necesita un tirante de 0.081 metros para que el material granular inicie el movimiento de partículas.

$$\frac{Y_{cr}}{d_{50}} = 408.98 \quad (4.6)$$

Se selecciona una escala vertical ($1/\lambda_y$) razonable de 1:60, ya que es la escala del modelo. Luego, se encuentra el valor “Z” y “ $1/\lambda_y$ ” para encontrar el factor de escala “ $1/\lambda_x$ ”. (ver Figura 3.21 y 3.22)

$$z = 8.45 \quad (4.7)$$

$$Re_{cr} = d_{50} \frac{\sqrt{gY_{cr}S}}{v} = 3.04 \quad (4.8)$$

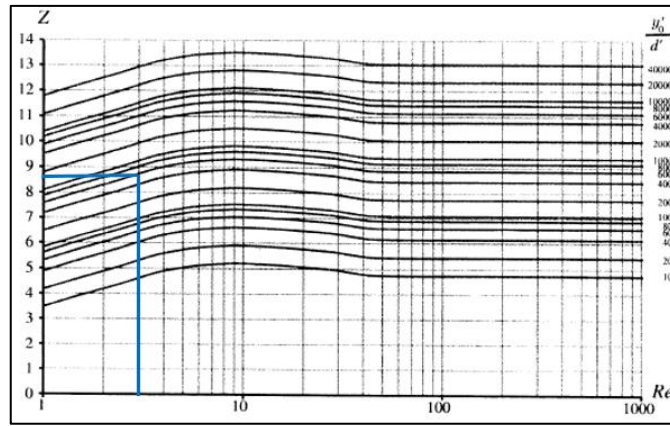


Figura 3.21. Solución gráfica generalizada para la obtención de valor “Z”.

$$z = 8.45 \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{\lambda_x} = 350 \quad (4.10)$$

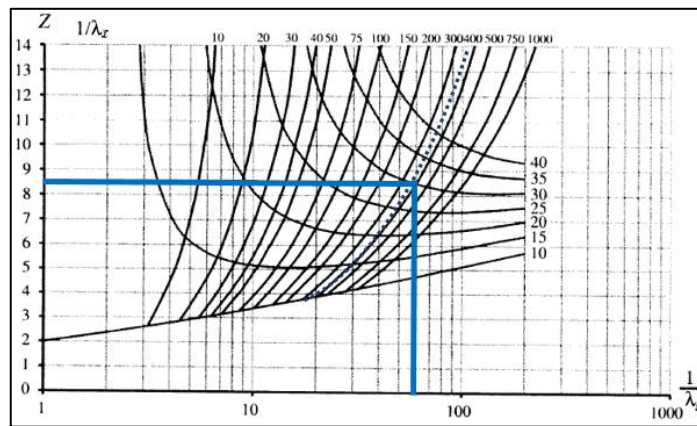


Figura 3.22. Solución gráfica generalizada para la obtención del factor de escala $1/\lambda_x$.

$$\frac{1}{\lambda_y} = 60 \quad (4.11)$$

$$n = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} = 5.83 \quad (4.12)$$

$$\lambda_{\gamma_s} = (\lambda_{\gamma_n})^{1.5} = 0.0303 \quad (4.13)$$

$$\gamma''_s = 1 + 1.65(\lambda_{\gamma_s}) = 1.050 \quad (4.14)$$

El tipo de material obtenido es el poliuretano ($\gamma''_s \approx 1.05 \text{ gr/cm}^3$), pero por dificultades económicas en la adquisición una gran cantidad de poliuretano, se decidió reemplazar este material por arena disponible en canteras cercanas, ya que el poliuretano es un material muy costoso y escaso en abundancia.

Los datos de granulometría fueron obtenidos por ODEBRECHT SAC (2014), los cuales fueron detallados en el capítulo 3 de esta tesis. Los tipos de suelos encontrados en el tramo del río denominado la Pastora son clasificados según Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) del tipo arenoso SP en la margen izquierda y del tipo arena limosa de grano fino SM en la margen derecha.

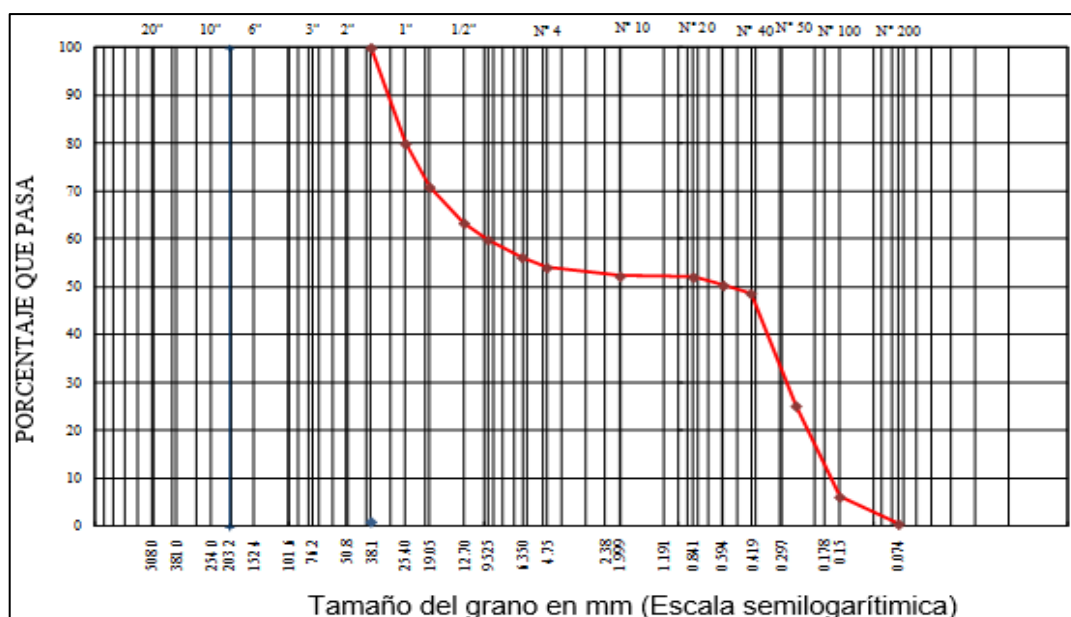


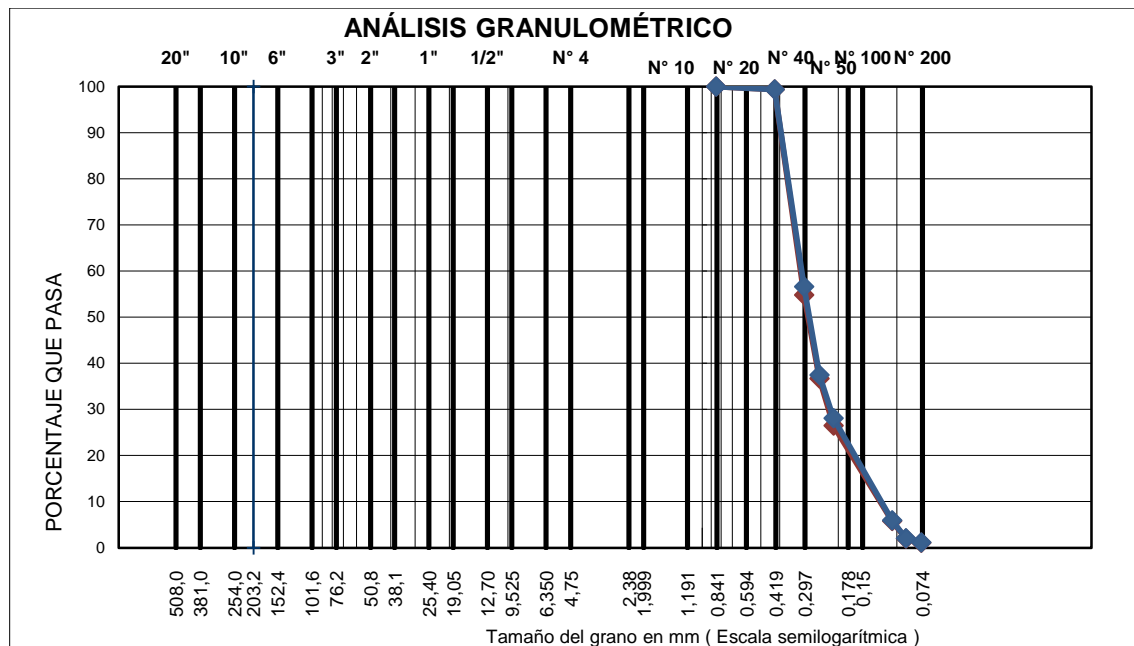
Figura 3.23. Curva granulométrica (Muestra D6) del material del lecho del río.

Fuente: Defensas Ribereñas -Zona la Pastora, Odebrecht, 2011.

Para determinar la granulometría del lecho del río a escala del modelo se tuvo en cuenta que esta no puede ser muy pequeño porque puede dejar de comportarse como material granular y presentarse fuerzas inter granulares de cohesión. Este fenómeno ocurre cuando $D < 0,1 \text{ mm}$. Por esta razón, se tomó parte de la curva granulométrica del material del lecho del río que cumple con esa condición (ver Tabla 3.18 y Figura 3.23).

Tabla 3.18. Granulometría a escala del del lecho del río Madre de Dios - Zona La Pastora

Abertura de Tamiz		Peso parcial retenido (g)	(%) Material acumulado en tamiz	
Prototipo (pulg.)	Modelo (mm)		Retenido	Que pasa
1 1/2"	0.635		0.00	100.00
1"	0.423	20	0.46	54.34
3/4"	0.318	9.1	0.66	33.56
1/2"	0.211	7.5	0.84	16.44
3/8"	0.154	3.5	0.92	8.45
1/4"	0.106	3.7	1.00	0.00



Nota: Se analizaron las granulometrías de diversas canteras, luego de lo cual se obtuvo una arena procedente de la cantera Lurín que en promedio se aproxima a la requerida en el modelo. Del otro lado se implementó un manto arcilloso sobre el talud de la margen derecha para evitar desprendimientos por baja plasticidad. (ver Figura 3.25)

3.3.4.2. Caudales Ensayados

Según lo mencionado en las características del prototipo el caudal que se desea ensayar es para un periodo de retorno de 50 años que supone un caudal de 14341 m³/s y para el cual han sido diseñado los espigones. Por lo tanto, aplicando la similitud cinemática para conseguir una proporcionalidad del campo de velocidades entre prototipo y modelo obtenemos los caudales para el modelo (ver Tabla 3.19).

Para lograr abastecer este caudal al modelo físico y calibrarlo es necesario realizar un sistema de bombeo de recirculación y crear estructuras de transición y control del flujo a la entrada y salida del modelo. El laboratorio nacional de hidráulica cuenta con 5 bombas que juntas impulsan un caudal teórico (no sucede debido a las deficiencias por desgates) total aproximado de 740 lt/s que cubrirían la demanda.

Tabla 3.19. Caudales del modelo.

T (años)	Qp (m3/s)	Qm (l/s)
Estiaje	1178	42.24
2.2	8003	287.00
25	12997	466.08
50	14341	514.28

3.3.5. Estructuras del Modelo Físico

3.3.5.1 Ingreso del Modelo

El ingreso del modelo se consideró la colocación de dos vertederos rectangulares, una poza de disipación y una poza de transición. Las medidas de los vertederos rectangulares son de 1 m x 0.5 m y 1.2 m x 0.5 m (ver Figura 3.26); luego, se ubica la poza de disipación que conecta a la poza de transición por medio de filtros colocados en la parte inferior del muro. La poza de transición vierte el agua de manera lenta y uniforme a la entrada del canal experimental. Cabe mencionar que la poza de disipación y transición son de las mismas dimensiones; cuyas medidas son de 0.92 m de ancho, 8 m de largo, y 2 m de profundidad con respecto al inicio del nivel del lecho arenoso.

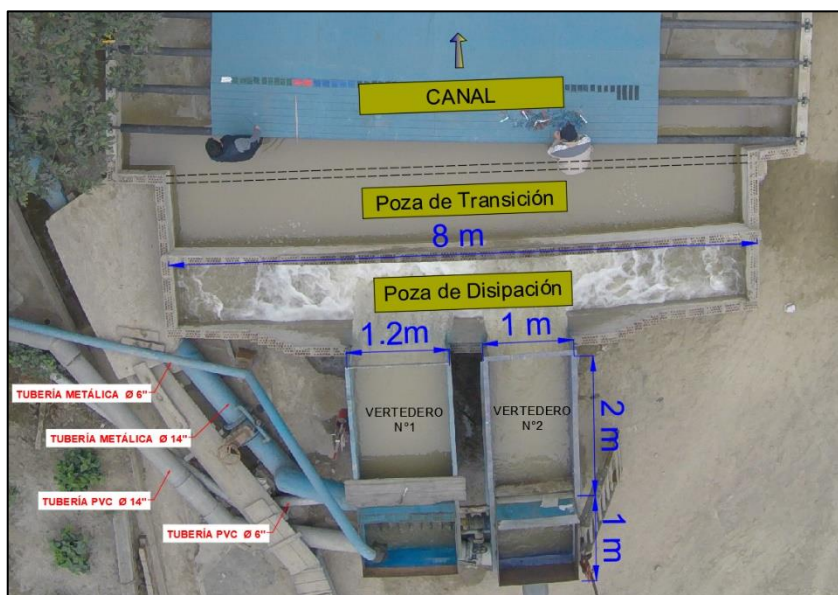


Figura 3.26. Vistas de los tanques vertederos, las pozas de disipación y transición ubicadas antes del inicio del canal experimental.

3.3.5.2. Canal experimental:

Los límites del modelo fueron conformados por un canal rectangular con muros de ladrillo (revestidos para evitar filtración) de 1.50 m de altura y con un fondo de concreto; el canal tiene un ancho medio de 9m y una longitud de 80.78 m. Sobre este canal se trasladaría la topografía y batimetría del río escaladas en 1/60, respetando la semejanza geométrica.

Para ubicarla se usaron 5 BM Y un punto llamado A identificados anteriormente en el prototipo. Usando estos puntos se replantearon el alineamiento del río y las 140 secciones obtenidas a partir de esta. Para finalmente, sobre los muros marcar dichas secciones en forma de progresiva (desde 0+000 – 4+380) que servirían para futuras mediciones y replanteos. Las secciones en el tramo recto (entrada y salida del modelo) tuvieron un espaciamiento de 1 m y en la zona curva con más detalle a 0.50 m.

El inicio del canal colinda con la poza de transición y al final del canal se fijan ladrillos, empleando sus lados como bases, de manera alternada; con el fin de que los calados no disminuyan por la caída del flujo hacia la primera poza de decantación (ver Figura 3.27).

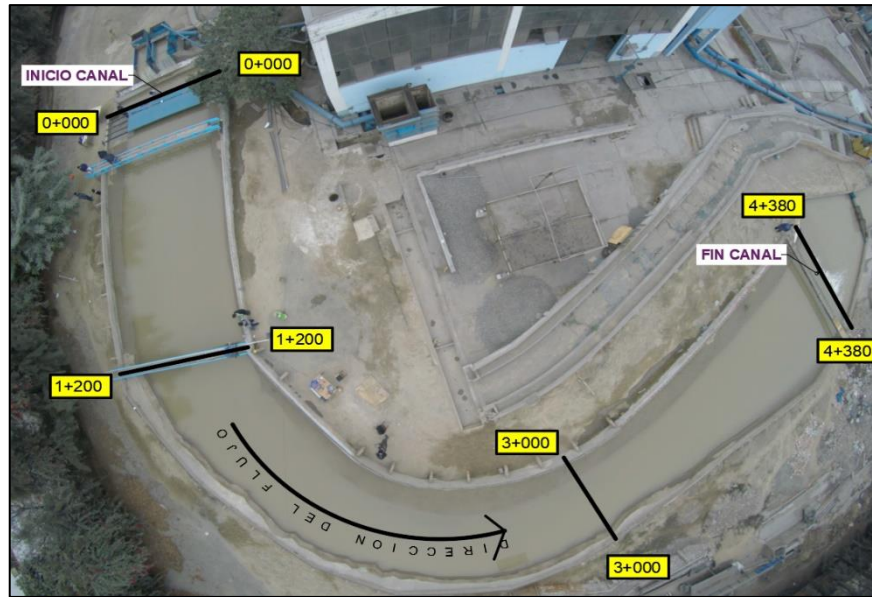


Figura 3.27. Vista desde un dron del canal experimental. En la imagen se aprecia los muros laterales y secciones relevantes del modelo.

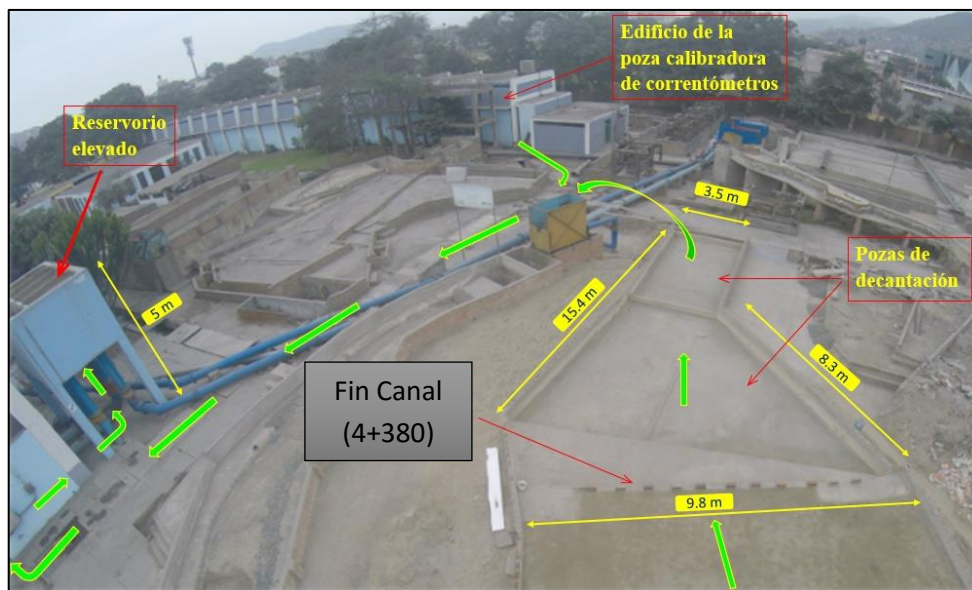


Figura 3.28. Vista del final del modelo. Las flechas verdes indican la recirculación del flujo.

3.3.5.3. Final del Modelo:

Al final del modelo se instalaron dos pozas de decantación en serie que permiten retener los granos gruesos de sedimentos. Además, en el muro que separa las dos pozas decantadoras se coloca una malla de acero galvanizado para retener todo material leñoso que pudiera ingresar al canal. Después de la segunda poza decantadora se presencia un canal abierto de 1 m x 1 m y que luego de unirse al canal de 0.5 m x 0.5 m que conecta a la poza de calibración, esta pasa a ser un canal cerrado de 1 m x 1 m. Finalmente, el canal cerrado o de retorno conduce el agua de regreso a la cisterna que alimenta de agua al sistema de bombeo. Todo lo anterior mente descrito se puede observar y comprender en la Figura 3.28.

3.3.5.4. Estructuras Auxiliares

Para lograr cubrir la demanda de agua solicitada por el hidrograma del modelo escalado con un caudal pico de 514.28 Litros por segundo se necesitan estructuras auxiliares. Estas, nos permiten manipular y controlar las condiciones de entrada y salida del modelo, y así lograr que los fenómenos hidrodinámicos sean lo más similar posible a los desarrollados en prototipo.

A. Sistema de bombeo

La alimentación de agua se realiza desde una cisterna de 80 m³, ubicada debajo del edificio de didáctica, hacia un reservorio elevado mediante un sistema de bombeo. El abastecimiento de agua del modelo es impulsado a través las bombas 1 y 2 hacia el reservorio elevado rectangular de 18 m³ de capacidad; el espejo de agua del reservorio está a 5 m del nivel del suelo. Las bombas 3, 4 y 5 impulsan el agua directamente desde la cisterna hacia los tanques vertedores de metal ubicados al inicio del modelo físico (ver Tabla 3.20 y Figura 3.29). Todas las electrobombas en teoría deberían impulsar un caudal total aproximado de 740 l/s, pero esto no sucede debido a las deficiencias por desgates, averías entre otros que estas han sufrido. Sin embargo, las electrobombas llegan a cubrir suficientemente el flujo requerido de 514.28 l/s para simular las avenidas máximas, que fluyen a lo largo del meandro de estudio del río Madre de Dios.

Tabla 3.20. Características de las bombas usadas para el modelo físico.

# DE BOMBA	CARACTERISTICAS	IMAGEN
BOMBA N°1	Serie: L386284 - Caudal: 200 L/s. - Altura: 9 m. - Potencia: 50 HP	
BOMBA N°2	Serie: L386285 - Caudal: 200 L/s. - Altura: 9 m. - Potencia: 50 HP	
BOMBA N°3	- Serie: 122764M - Caudal: 200 L/s. - Altura: 10 m. - Potencia: 50 HP	
BOMBA N°4	- Serie: 122831M - Caudal: 100 L/s. - Altura: 10 m. - Potencia: 20 HP	
BOMBA N°5	- Serie: NV760M4 - Caudal: 10 L/s. - Altura: 3 m. - Potencia: 10 HP	



Figura 3.29. Tanque elevado permanente para el almacenamiento de agua junto a las tuberías de impulsión con sus respectivas válvulas.

B. Cisterna principal

El modelo necesitó de gran cantidad de agua para lograr su equilibrio en la recirculación, y así se evitó alteraciones del caudal en el modelo a causa de lo siguiente: Al iniciar el bombeo parte del agua se mantuvo en el reservorio elevado, tuberías, tanques vertedores de metal, poza de disipación y transición, pozas de decantación, canal de retorno, y sobre todo en la saturación total del lecho arenoso del canal experimental curvo. Por otro lado, se tuvo las pérdidas de agua a lo largo de la recirculación (detectables), en las uniones de la base de concreto con muros cubiertos por lecho arenoso (no detectables) entre otros. Por tal motivo, el volumen de agua de 80 m³ que posee la cisterna subterránea no fue suficiente frente a estos inconvenientes, así que se tuvo la necesidad de usar la carga de agua de la poza de calibración de correntómetros y la poza de suministros a instrumentos didácticos (ver Figura 3.30).



Figura 3.30. Cisterna y Pozas que abastecen de agua al modelo Físico. De izquierda a derecha; cisterna principal de 80 m³, Poza de calibración de correntómetros y poza de suministro a instrumentos didácticos.

C. Poza calibradora de correntómetros

La poza ocupa todo un edificio ubicado en la parte norte-oeste del modelo, cuya función es específicamente para otros tipos de ensayos. Las dimensiones de esta poza son de 3 m de ancho, 5 de profundidad y 60 m de largo; por consiguiente, su nivel de agua aporta bastante a mantener el equilibrio estable del nivel de agua, requerido por el sistema de bombeo, en la cisterna. La poza se conecta a la recirculación a través de un canal de 0.5 m x 0.5 m (ver Figura 3.30).

D. Poza de suministro a instrumentos didácticos

El volumen de agua de esta poza es usado para el suministro de instrumentos de laboratorio con fines didácticos, pero en este caso se emplea su volumen para ayudar a mantener el nivel de agua estable de la cisterna de bombeo. Esta poza está ubicada por debajo del edificio de didáctica de la misma

manera que la cisterna, pero al extremo opuesto dentro del edificio. Las medidas de la poza son 2.5 m de ancho, 4 de profundidad y 19 m de largo. El agua de la poza se bombea a un reservorio elevado ubicado dentro del edificio y esta envía el agua hacia la cisterna donde operan las 5 electrobombas ya descritas (ver Figura 3.30). Es necesario agregar, que además de estas dos pozas, antes de iniciar los ensayos se abren todos los grifos de agua presentes en el canal de retorno y pozas.

E. Tuberías de alimentación.

El reservorio elevado ubicado en el exterior del edificio de didáctica alimentó de agua a los tanques vertedores mediante una tubería metálica de color azul de 356 mm (14") de diámetro. La bomba 3 impulsó el agua directamente desde la cisterna por medio de una tubería de PVC de 356 mm (14") de diámetro; del mismo modo, las bombas 4 y 5 alimentaron los tanques por medio de una tubería metálica de color azul y de PVC de 153 mm (6") de diámetro cada una respectivamente (Ver Figura 3.31). Los flujos de cada tubería se manipularon y controlaron mediante válvulas de compuerta. El flujo turbulento acarreado por las tuberías llega por la parte posterior de los tanques vertedores metálicos, luego la turbulencia fue disipada por mallas metálicas antes de ser vertidos a la poza de disipación.



Figura 3.31. Vista posterior de los tanques metálicos vertedores conectados a las cuatro tuberías de alimentación.

Los limnómetros se colocaron cerca del vertedor rectangular de cada tanque para cuantificar el caudal de diseño; cuya cantidad se obtuvo mediante la manipulación de las válvulas compuerta colocadas en las tuberías, y válvulas globo colocadas debajo de los vertederos. Las medidas de los vertedores rectangulares fueron de 1 m x 0.5 m y 1.2 m x 0.5 m (ver Figura 3.26); luego, se ubicó la poza de disipación que conectó a la poza de transición por medio de filtros colocados en la parte inferior del muro. La poza de transición vertió el agua de manera lenta y uniforme a la entrada del lecho del modelo. Cabe mencionar que la poza de disipación y transición fueron de las mismas dimensiones; cuyas medidas fueron de 0.92 m de ancho, 8 m de largo, y 2 m de profundidad con respecto al inicio del nivel del lecho arenoso.

3.3.6. Descripción de los equipos

3.3.6.1. Equipo de medición de velocidades del flujo

Para medir las velocidades del flujo se usó un equipo de alta precisión que puede medir velocidades en tres direcciones a tasa de muestreo de hasta 100 Hz. El equipo usado se llama Vectrino Profiler (ver Figura 3.32) de la marca holandesa Nortek, y usa el efecto Doppler para medir velocidades (ADV). Adicionalmente, este equipo mide la temperatura del fluido con rangos que van desde -4°C

a 40° C y puede hacer una detección de distancia al fondo mostrando datos de profundidades en tiempo real con una Tasa máxima de detección de 10 Hz (Ver Tabla 3.21).

Tabla 3.21. Especificaciones técnicas del Vectrino Profiler traducidas del manual Nortek.

Detalle	Especificación	Descripción
Mediciones de velocidades	Rango de velocidad	Incrementos de 0.1 m/s a un máximo de 3.0 m/s
	Intervalo de Ping adaptable	Una vez, o en intervalos de 1 segundo a 1 hora
	Precisión	±1 mm/s
	Tasa de muestreo	1-100 Hz
Mediciones de Fondo	Rango mínimo	20 mm
	Rango máximo	Hasta 2 m dependiendo de la intensidad de la señal.
	Tamaño de celda	1-4 mm (elegido por el usuario)
	Precisión	0.5 mm a 1 mm del tamaño de celda
	Tasa de muestreo	1-10 Hz
Volumen de muestra	Rango del perfil	Hasta 30 mm
	Localización	45- 75 mm de la sonda.
	Diámetro	6 mm
	Tamaño de celda	1-4 mm
Sensor de temperatura: Termistor empotrado en la sonda.	Rango	−4°C a 40°C
	Precisión/resolución	1°C/0.1°C
	Tiempo de Respuesta	5 min

Para su funcionamiento el Vectrino Profiler debe estar conectado a una computadora personal y a una fuente de energía constante (ver Figura 3.32). Mediante su software se puede ajustar la tasa y cantidad de datos recolectados, visualizar los datos de muestreo en tiempo real, obtener estadísticas (medias y desviaciones típicas), verificar el funcionamiento del equipo, y exportar datos en formatos .mat y ASCII para un posterior post procesamiento en Matlab y Excel.

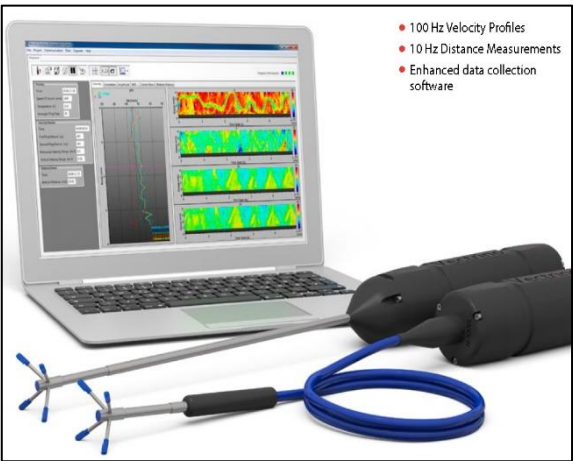


Figura 3.32. Imagen referencial del Vectrino Profiler.
Fuente: Folleto de Nortek AS.

El Vectrino Profiler necesitó de la construcción de un soporte metálico móvil que se deslizará sobre un puente metálico de 10 m de longitud para poder hacer las mediciones correspondientes sobre los puntos asignados en cada sección (Ver Figura 3.33).

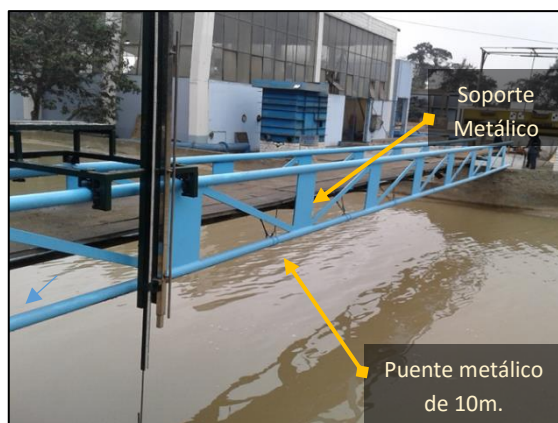


Figura 3.33. Soporte Metálico móvil del Vectrino Profiler construido por el LNH.

3.3.6.2. Equipo de medición del lecho del modelo

La batimetría o nivel de lecho se midió con un Escáner Laser que emplea tecnología 3D que le permite capturar el objeto en una fotografía tridimensional basada en una nube de millones de puntos. El trabajo en campo del Escáner Laser consistió en reconocer el modelo físico y ubicar puntos de control en lugares específicos cercanos al modelo físico para poder armar un conjunto de estaciones. Usando estas estaciones se hace un barrido con el escáner, levantando finalmente toda la información topográfica (ver Figura 3.35).



Figura 3.34. Escáner laser modelo Focus3D X 330.

Fuente: Folleto de Escáner Laser modelo Focus3D X 330 marca FARO.

El instrumento usado fue el Escáner laser modelo Focus3D X 330 (ver Figura 3.34 Y Tabla 3.22) que tiene un alcance de 330 metros con un campo de visión de 270° en vertical y 360° en horizontal, con una obtención de 50,000 puntos por segundo. Además, el escáner posee un GPS integrado y la posibilidad de realizar escaneos bajo luz solar directa y repercute la refracción existente que viaja el láser a través de dos medios como el agua y aire como una corrección de camino.

Tabla 3.22. Especificaciones Escáner laser modelo Focus3D X 330.





Especificación	Descripción
Rango del Focus3D X 330	0,6 m - 330 m interior o exterior con incidencia vertical hasta
Superposición fotográfica	Hasta 165 megapíxeles en color
Intervalo de precisión:	De 122 hasta 488 Kpts/seg. a 614 m; de 976 Kpts/seg. a 307 m
Velocidad de medición	122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000
Error de intervalo:	±2 mm

Luego de realizar el levantamiento topográfico se procesó esta información con el software del equipo, obteniéndose una nube de puntos que fueron exportados a formato de modelo digital de terreno. Con los datos registrados por el Escáner Laser se podrán obtener profundidades de erosión y sedimentación en el cauce. Esto se logra comparando la topografía escaneada antes y después de los ensayos.



Figura 3.35. Trabajos de escaneo en el modelo usando escáner laser modelo Focus3D X 330.

Tabla 3.23. Especificaciones técnicas de los equipos topográficos.

Equipo	Especificación	Descripción
PENTAX MODELO AFL -321 	Aumentos	32x
	Factor de multiplicación	100
	Precisión de la reflexión	± 0.3"
	Desviación estandar*	± 0.8 mm
	(1km niveladas de doble recorrido)**	± 0.4 mm
LEICA MODELO NA 820 	Aumentos	24x
	Factor de multiplicación	100
	Precisión de la reflexión	-
	Desviación estandar*	± 0.8 mm
	(1km niveladas de doble recorrido)**	± 0.4 mm
TOPCON SERIE GPT 3002- LW 	Precision Angular"	2"
	Lectura Angular	1"/5"
	Metodo	Lectura absoluta
	Compensacion	Dual
	Magnitud, Diámetro, Aumento- Telescopio	150 mm, 45 mm, 30x
	Rango de Medición (1 prisma)	3000m
	Precision de medición	3mm+2ppm
Regla graduada de aluminio de 12 m de longitud con carro deslizante. 	Precision	2 mm
	Dimensiones	2" x 3" x 20 m
	Plomada	Varilla de aluminio ½" x 1.4 m.

3.3.6.3. Equipos de replanteo topográfico y de colocación de espigones

Antes de realizar cada ensayo experimental se debe acondicionar el lecho a la batimetría y topografía modelados en escala 1/60, haciendo un replanteo topográfico con gran precisión. De la misma forma para ubicar cada alternativa de diseño de espigones se debe acondicionar su posición de cada espigón a las cotas y ángulos establecidos en el diseño, asegurando que los resultados de los ensayos sean lo más parecidos a la realidad. Las características de cada equipo pueden verse en la Tabla 3.23.

- Para realizar el replanteo del lecho se hizo uso de dos equialtímetros, miras topográficas, nivel de mano tubular, martillos y badilejos. Así mismo, se construyó una regla graduada de aluminio que se instalaría sobre cada sección usándose como plomada.
- Los materiales usados para esta regla fueron 2 perfiles de aluminio 2" x 3" de 6 m de longitud, madera tornillo de 1.2 m de longitud de dimensiones 2"x3", cinta métrica de 20 m de longitud y una varilla de aluminio de ½" de diámetro de 1.4 m de longitud.
- Para la ubicación de los espigones en el modelo físico se hizo uso de una estación total de la marca TOPCOM, un prisma, nivel de mano tubular, martillo y badilejo.

3.3.6.4. Equipos de medición de caudal y tirantes

Durante los ensayos fue necesario hacer mediciones de tirantes y caudales para calibrar el modelo y para realizar un post-procesamiento de la información obtenida de campo.

- Para hacer las mediciones de tirantes se usó una mira topográfica, nivel de mano tubular y un equialtímetro de la marca Leica Modelo NA 820 (Ver Tabla 3.23).
- Los equipos utilizados para cuantificar los caudales fueron dos limnómetros que se colocaron del lado de los vertedores rectangulares (ver Figura 3.36). La descripción de los vertederos fue dada en el título de "Estructuras del modelo físico" del presente capítulo.



Figura 3.36. Medición de caudales en el vertedero N°1 con Limnómetro

3.3.6.5. Patrones de flujo

Para hacer tomas fotográficas y grabar videos aéreos que nos permitan visualizar los patrones de flujo se usó un dron de la marca 3dr Solo con una cámara 4k Gopro Hero 4 (Ver Figura 3.37).



Figura 3.37. Dron (3DR-Solo) con cámara Gopro Hero 4

3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.4.1. Trabajos de Acondicionamiento del Modelo Físico

3.4.1.1. Acondicionamiento del Lecho

Antes de realizar cada ensayo, como primer paso, es necesario acondicionar el terreno del modelo físico, que se encuentra dentro del canal, a la batimetría del Río obtenida de los estudios básicos.

Después de procesar los datos de batimetría se obtuvieron secciones transversales al eje del río cada 20 m con progresivas que iban desde la 0+000 a 4+380. Estas secciones están conformadas por una serie de puntos, y divididas por la posición del eje en puntos negativos y positivos. La asignación se debe a una convención de signos que marca la margen derecha como positiva y la margen izquierda como negativa.

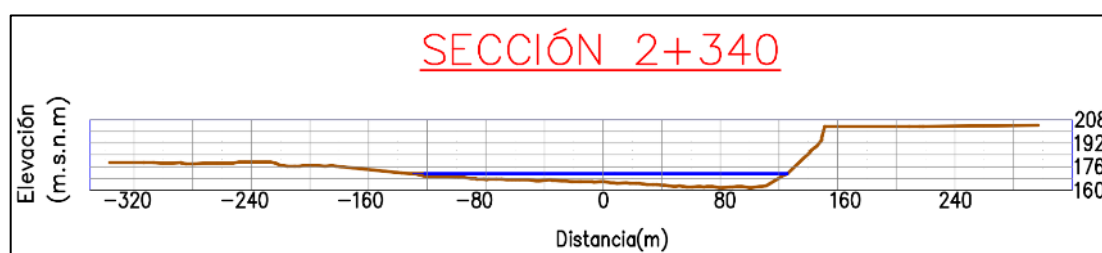


Figura 3.38. Sección 2+340 de la Pastora, usada para el replanteo de la batimetría del Río.

Tabla 3.24. Cota y posición con respecto al eje de puntos negativos de la sección 2+340.

SECCION 2+340	
COTA	EJE X
177	-273.0
176	-268.5
175	-264.0
174	-259.4
173	-254.5
172	-247.5
172	-225.9
171	-190.4
170	-168.0
169	-149.3
168.5	-117.6
168	-68.2
167.5	-14.1
167	-8.9
166.5	-3.7

En el prototipo se identificaron 5 Marcas de Referencia (BM) que sirvieron para trasladar los ejes del río y las secciones durante la construcción del modelo. Por lo tanto, cada punto que conforma la sección tiene también asignado una cota y una posición horizontal con respecto a estos 5 BM.

Lo primero que se hizo para acondicionar el lecho, es llevar las cotas de los puntos de la batimetría al modelo experimental mediante un trabajo de replanteo topográfico. Para esto, fue necesario la utilización de equipos topográficos como: dos equialtímetros, miras topográficas, regla de aluminio de 12 m, nivel de mano tubular, martillos y badilejos (Ver subtítulo 3.3.6.3). Así mismo se usó como material tarugos de madera pintados de diferente color (cada color asignado a una cota) para poder materializar cada punto sobre el terreno.

Tabla 3.25. Cota de los 5 BM en el modelo físico.

PUNTO	Cota (msnm.) Prototipo	Cota (msnm.) Modelo
BM1	156.8913	99.951
BM2	152.6531	99.883
BM3	211.8594	100.866
BM4	207.6125	100.797
BM5	203.351	100.726

Tabla 3.26. Gama de colores de tarugos empleados en replanteo topográfico.

Cota	Color	Cota N°1	Cota N°2	Cota N°3	Cota N°4
Rojo		165.5	172.5	184	204.5
Blanco		165	172	182	204
Amarillo		164.5	171.5	180	203.5
Marrón claro		164	171	179	203
Rosado		163.5	170.5	178.5	202
Verde oscuro		163	170	178	201
Plomo		162.5	169.5	177.5	200
Anaranjado		162	169	177	199
Verde Claro		161.5	168.5	176	198.5
Negro		161	168	175	198
Verde Agua		160.5	167.5		196
Azul		160	167	174	195
Celeste		159.5	166.5	173.5	194
Marrón Oscuro		159	166	173	189

El procedimiento del replanteo fue el siguiente:

- Riego del terreno antes y durante el trabajo diario para mejorar la trabajabilidad con la arena (con mayor frecuencia en la estación de verano).
- Se instaló el nivel de ingeniero a una distancia adecuada para barrer las progresivas de las secciones a trabajar durante el día. Se seleccionó para la lectura, el BM más próximo de la zona a trabajar.
- Se ubica la mira sobre el BM (la verticalidad se asegura con la ayuda de un nivel de mano tubular) y desde el nivel se lanza una visual para obtener su lectura.



Figura 3.39. Tomando lectura al BM1 para replantear el tramo del cauce 0+120-0+960.

- Cuando se construyó el modelo físico, las secciones fueron marcadas sobre los muros del canal a modo de progresiva y el posicionamiento de cada punto fue ubicado en Tablas respecto al muro lateral derecho del canal (ver Figura 3.39). De esta forma solo es necesario calcular las cotas de cada punto en el modelo y para lo cual se implementó la siguiente formula:

$$\text{Cot. pto } p = \text{Cot. BM } p + (\text{Lect. BM} - \text{Lect. pto}) 0.60$$

Lect. BM	: Lectura sobre el punto BM _p (cm)
Lect. pto	: Lectura sobre el punto pto _p (cm)
Cot. BM _p	: Cota del BM en prototipo (m)
Cot. pto _p	: Cota del punto en prototipo (m)

Ubicamos en el modelo la progresiva a trabajar e instalamos la regla graduada de aluminio de 12m sobre la misma. La regla nos sirve para ubicar el eje del río y marcar la posición de cada punto de la sección a replantar. Definidos estos puntos procedemos a materializarlos con los tarugos de madera con el color asignado para cada cota (ver Tabla 3.26 y Figura 3.40).



Figura 3.40. Ubicando y colocando tarugos de madera sobre el terreno.

Con las cotas del modelo calculadas y la ubicación de los puntos materializada, procedemos a ubicar la mira sobre cada tarugo de la sección. Realizando con el nivel la lectura, se manipula el tarugo hasta ubicarlo a su cota correspondiente (Lect. pto).



Figura 3.41. Replanteo de los 34 puntos de la sección 1+200.

El error máximo tolerable en el trabajo de replanteo del lecho fue de ± 1 mm y el número de secciones replanteadas fue de 94, correspondiendo a un total de 3416 puntos. Esto implicó un trabajo concienzudo y agotador que duró aproximadamente 20 días.

Al finalizar el trabajo de replanteo, la parte superior de los tarugos nos delinean la forma que deberían tener todas las secciones del lecho y bastará realizar el segundo trabajo de acondicionamiento que es el regleo.

En el trabajo de regleo el maestro albañil especializado en modelos hidráulicos, une las secciones al nivel de la parte superior de los tarugos realizando movimiento de tierras entre su espaciamiento (relleno o excavación). Identificando los tarugos que tienen la misma elevación (color asignado) en cada sección, las va enlazando una tras otra hasta darle la forma y elevación correcta a la superficie del lecho. Este trabajo tuvo una duración de 7 días y se usaron los siguientes equipos: badilejos, palanas, baldes, planchas, y reglas de madera y aluminio (Ver Figura 3.42).



Figura 3.42. Trabajos de regleo del lecho para su acondicionamiento final.

3.4.1.2. Construcción de los espigones a escala 1/60:

Para el modelamiento de los espigones se usó la similitud geométrica con un único factor de escala de 1/60. En los ensayos experimentales, como ya se ha mencionado, no se evalúan las variables que intervienen en la estabilidad estructural del espigón sino las variables que intervienen en su geometría.

La geometría de los espigones fabricados con troncos de árboles responde a su similitud con los atascos de troncos de madera naturales y está formado por tres estructuras principales: Troncos perpendiculares al flujo y/o anclado a la ribera, troncos en dirección del flujo y pilotes (los dos primeros con sus fajos de raíces). Las características del diseño han sido mencionadas en el subtítulo 3.2.3 de la presente tesis y en este título solo se mencionarán los trabajos realizados para su construcción a escala. A modo de ejemplo se muestran las dimensiones geométricas que tendría un espigón de forma general. (Ver Tabla 3.27 y Figura 3.43).

Tabla 3.27. Dimensiones de la madera empleada para el modelo físico.

Descripción	Medida en Prototipo (m)	Medida en Modelo (cm)
Diámetro de la Troza	0.6	1
Diámetro Promedio del fajo de Raíz	1.5	2.5
Longitud Promedio del Fajo de Raíz	0.75	1.25

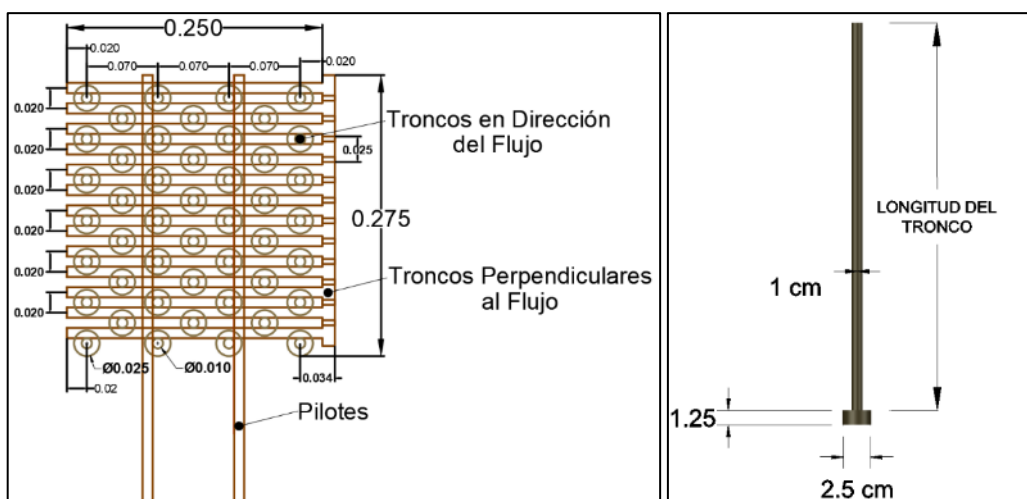


Figura 3.43. Dimensiones geométricas de un espigón general (dimensiones en m) y de los troncos individuales.

La elección de la madera usada para el modelo estuvo sometida al presupuesto, dimensiones geométricas, propiedades, y accesibilidad de compra en la zona de Lima. Analógicamente el material de madera elegido fue el mismo que en el prototipo, logrando encontrar al fabricante (Pequeños S.R.L) que nos abastecería durante los 3 ensayos.

Se pidió que la madera sea proporcionada en listones de 1.40 m de longitud y en diámetros de \varnothing 1 cm y \varnothing 2.5 cm. Los listones de madera de 1 cm de diámetro serían utilizados para construir los troncos perpendiculares, en dirección del flujo y pilotes; y los listones de madera de 2.5 cm de diámetro serían utilizados para fabricar las raíces (Ver Figura 3.44). Por otra parte, para unir los elementos de cada espigón, fue necesario la compra de listones de madera Capirona de \varnothing 5 mm de diámetro y de pegamentos como cola de carpintero y triz.



Figura 3.44. Material de madera empleada para la construcción de los espigones a escala.

La fabricación de los espigones se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica en el Área de Carpintería. Los encargados de su construcción fue el maestro ebanista y los tesistas del modelamiento físico del proyecto La Pastora. A ellos se les proporcionaría los planos de detalles de los espigones (escalados a 1/60) en la vista en planta, perpendicular al flujo y en dirección del flujo.

La construcción de los espigones empieza por el corte de los listones de madera de \varnothing 1 cm y \varnothing 2.5 cm en las longitudes señaladas por los planos, y el corte de los listones de 5 mm en longitudes de 1 cm. Una vez cortado el material se marcan los puntos de intersección entre los troncos perpendiculares y en dirección del flujo, y los puntos donde se fijarán sus raíces. Luego, sobre estos, se hacen perforaciones de 5 mm de diámetro y de 5 mm de profundidad (Ver Figura 3.45).



Figura 3.45. Corte y Perforación de la madera usada en los elementos del espigón.

Ya hecha las perforaciones se aplica una capa de goma en ellas y se procede a unir los troncos insertando en ambos lados de los elementos un mismo tarugo de 5 mm de espesor y una longitud de 1cm. De esta forma los espigones se van armando por entramados hasta lograr la altura final (Ver Figura 3.46).



Figura 3.46. Trabajos de armado de los entramados de troncos.

Finalmente, los pilotes fueron sujetos a los entramados en el momento en que se hacía su instalación sobre el lecho experimental. El tiempo que demandó la construcción de los espigones fue de 25 días y el trabajo tuvo que repetirse después de cada ensayo.

3.4.1.3. Colocación de los espigones en el lecho experimental.

La ubicación de los espigones en el lecho experimental está enlazada al esquema de diseño realizado en el prototipo; y se ejecuta una vez finalizados los trabajos de acondicionamiento del lecho y construcción de espigones.

En el esquema de diseño están Georreferenciados los 5 BM y un Punto A. Los cuales fueron utilizados para trasladar la geometría del cauce del río al modelo físico experimental. Aprovechando su materialización en el modelo se decide usar dos de ellos para ubicar los espigones (Punto BM_3 y Punto A).

La línea que los une ($\overline{ABM_3}$) fue la línea de referencia; y el punto A, el punto de estación del equipo. Sobre el eje de cada espigón se ubicaron 2 puntos: Punto de inicio del espigón y punto medio ($I_{1...n}$ y $M_{1...n}$). Se unió cada uno de estos puntos al Punto A obteniendo las líneas $\overline{AI_{1...n}}$ y $\overline{AM_{1...n}}$. Luego se midió su longitud y se halló el ángulo horizontal que forman con línea de referencia $\overline{ABM_3}$. Con estos ángulos y longitudes los espigones quedaron referenciados.

Aprovechando la similitud geométrica bastara con escalar las longitudes ($\overline{AI_{1...n}}$ y $\overline{AM_{1...n}}$) y llevar los ángulos al modelo mediante un replanteo topográfico. Para realizar este trabajo se hace uso de estación total, prismas, estacas de fierro, martillo y regla de aluminio de 12m.

El trabajo empieza con la instalación de la estación total sobre el punto A. A partir de este punto se lanza una visual hasta el punto BM_3 y se fija nuestra línea de referencia $\overline{ABM_3}$ ($0^\circ 0' 00''$). Para ubicar el punto I_{11} , por ejemplo; giramos la alidada hasta fijarla en un ángulo horizontal de 89.3° (ver Figura 4.27) en sentido antihorario. Y en esta línea visual, usando el distanciómetro y el prisma, lo ubicamos a una distancia $\overline{AI_{11}}$ (Ver Figura 3.47).

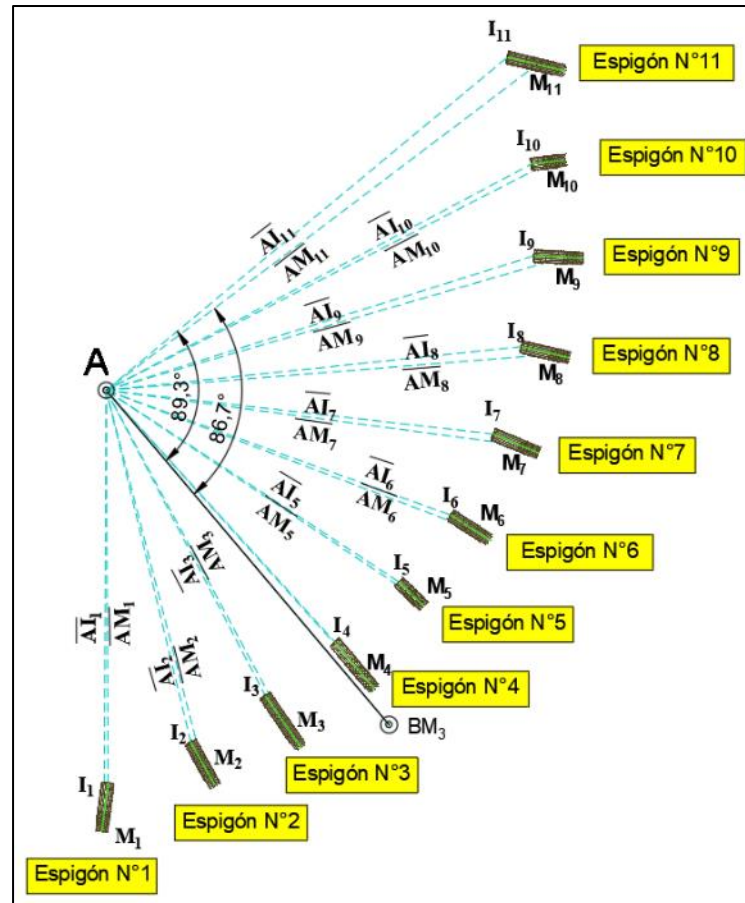


Figura 3.47. Referenciación de los espigones en el esquema de diseño N°2.

El mismo procedimiento se realiza para todos los puntos ($I_{1...n}$ y $M_{1...n}$) y se les materializa con una estaca de fierro. La unión de los puntos $I_{1...n}$ $M_{1...n}$ son los ejes de cada espigón y para no perder su posicionamiento son marcados sobre los muros del canal con la ayuda de la regla de aluminio de 12m.

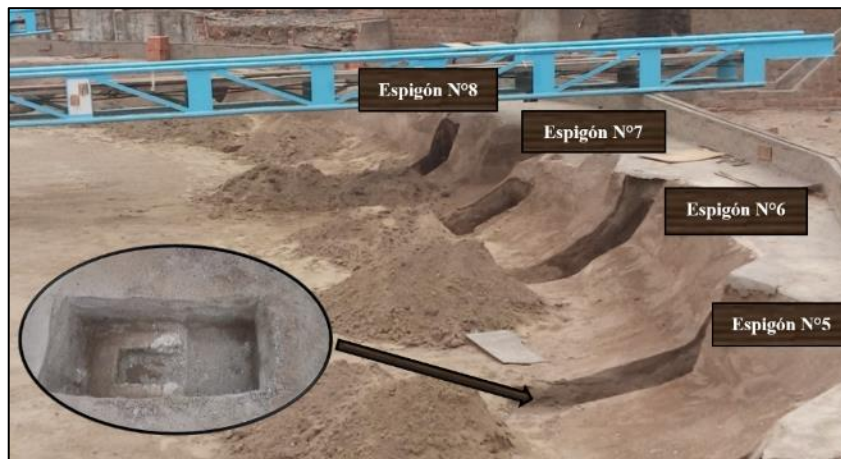


Figura 3.48. Trabajos de excavación y demolición del área que ocuparon los espigones.

Para evitar su desplazamiento durante los ensayos; los espigones estuvieron empotrados al talud del modelo y adheridos al lecho mediante sus pilotes. Para lograrlo, una vez finalizado el trabajo de replanteo; se señaló el área que ocuparía cada espigón y sobre esta área se realizaron trabajos de excavación y demolición. La demolición se llevó a cabo sobre el área de la losa a una altura de 10 cm por debajo del fondo del canal (Ver Figura 3.48).

Luego sobre el área picada se vierte una capa de mortero de 10 cm (cemento más arena) y se “presenta” el espigón encima de ella. Sobre los ejes señalados en los muros del canal se coloca la regla de aluminio, se ubica la posición de inicio y final del espigón; y se verifica su horizontalidad con un nivel tubular. Luego con mucho cuidado se insertan los pilotes en las posiciones establecidas por el diseño y se deja reposar durante 2 días (Ver Figura 3.49).



Figura 3.49. Trabajos de empotramiento de los espigones.

Después de haber fraguado el cemento, los pilotes quedaron adheridos a la losa del canal y fijaban la ubicación del espigón en un plano horizontal. De modo que solo hacía falta hacerlo en un plano vertical (Ver Figura 3.50).



Figura 3.50. Espigones por posicionar verticalmente.

Para lograrlo se realizó un procedimiento similar al del replanteo topográfico del lecho del modelo; pero, en lugar de trasladar los niveles de terreno de prototipo a modelo se haría con los niveles de altura final de los espigones de prototipo a modelo. Cabe decir que la cota de diseño de los espigones lo marca el nivel que alcanza el entramado.

Los niveles quedaron registrados sobre los pilotes y solo hizo falta deslizar el entramado hasta alcanzarlos, para luego sujetarlos con precintos de seguridad. En este proceso siempre se cuidó no perder su posición horizontal. Finalmente, con el posicionamiento del espigón final se le da el acabado correcto al nivel del lecho y talud como lo indica la batimetría (Ver Figura 3.51).



Figura 3.51. Espigones en su posición final sobre el lecho. Al lado izquierdo trabajos de enlucido del talud y al lado derecho presentación final de los espigones.

3.4.2. Ejecución de pruebas y recolección de datos

Esta tesis forma parte del proyecto de investigación financiado por INNOVATE PERU llamado “Espigones Fabricados Con Troncos de árboles: Una Alternativa Contra la Erosión en Ríos Meándricos” que involucra la participación de tesis de postgrado y pregrado. Es así que los ensayos experimentales programados no son de carácter individual y el enfoque de las distintas tesis requiere la toma de datos correspondientes a sus objetivos sin olvidar el objetivo principal del proyecto.

Esta tesis tiene el objetivo de diseñar los espigones fabricados con troncos de árboles y explicar su proceso. Para lograr este objetivo el análisis de datos tuvo un enfoque principalmente en los datos de velocidades y batimetrías, que se obtuvieron de la totalidad de los ensayos realizados para este proyecto.

Se programaron 6 ensayos en el modelo físico La Pastora, tres de ellos con espigones y 3 sin estructuras. La etapa experimental se desarrolló entre los meses de Setiembre del 2016 y febrero del 2017, ajustándose al presupuesto del proyecto y los plazos establecidos por tal (ver Tabla 3.28).

Los ensayos se realizaron gracias al apoyo del Director del Laboratorio Nacional de Hidráulica, Investigadores, Personal del Laboratorio y los Estudiantes de pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Tabla 3.28. Cronograma de ensayos del modelo físico la Pastora.

Prueba	Condición	Fecha	Duración del Ensayo (hrs)	Duración Medición de Velocidades
1	Sin espigones	30 de Agosto de 2016	06:00 – 18:00	10:15 - 17:45
2	Sin espigones	22 de Setiembre de 2016	05:00 – 17:15	9:15 - 17:00
3	Con 12 espigones	27 de Octubre de 2016	02:35 – 22:30	6:30 - 22:15
4	Con 11 espigones	20 y 21 de Diciembre 2016	22:00 – 19:00	2:15 - 18:45
5	Sin espigones	25 y 26 de Enero 2017	17:45 – 12:55	1:30 - 9:00
6	Con 12 espigones	24 y 25 de Febrero de 2017	11:00 – 14:00	16:00 - 13:45

El primer ensayo tuvo como objetivo realizar trabajos de calibraciones. El caudal ensayado fue de 286.88 l/s que corresponde a un caudal en prototipo de 8000 m³/s para un periodo de retorno de 2.2 años. El segundo, tercer y cuarto ensayo se realizaron con un caudal en modelo de 466 l/s que corresponde a un caudal en prototipo de 12997 m³/s. Los factores que determinaron estas condiciones estaban relacionados con problemas logísticos para adquirir una nueva bomba de impulsión. En los siguientes dos ensayos se logró alcanzar el caudal en modelo de 514.28 l/s y en prototipo de 14341 m³/s, correspondientes a un periodo de retorno de 50 años.

El segundo ensayo se realizó sin estructuras para analizar los cambios dinámicos del río sin intervención humana. En el tercer ensayo se pone a prueba el primer esquema de diseño, y los resultados obtenidos de este son comparados con los del anterior. A continuación, se realiza el mismo procedimiento para el cuarto y sexto ensayo comparando sus resultados con los ensayos previos. De esta forma se fue optimizando el diseño hasta lograr el de mejor resultados.

El quinto ensayo fue realizado hacia el análisis de transporte de sedimentos en el río sin estructuras cuyo objetivo no es mención para esta tesis. En este ensayo se introdujo sedimentos, variando las condiciones físicas con respecto a los otros ensayos. No obstante, los resultados que se obtuvieron tienen un origen diferente, aun son útiles en el análisis general de los cambios hidrodinámicos y morfológicos del cauce del Río Madre de Dios sin estructuras.

Tabla 3.29. Caudales en prototipo y modelo utilizados en los ensayos.

Caudal en prototipo (metros ³ /seg.)	Tiempo en prototipo (horas)	Nivel de agua (m.s.n.m.)	Caudal en modelo (Litros/seg.)	Hora de inicio Referencial en el modelo
1790	4.5	171.43	64.19	02:35:00 a.m.
4140	9	173.74	148.46	03:10:00 a.m.
6810	13.5	176.09	244.21	03:45:00 a.m.
9500	18	178.18	340.68	04:20:00 a.m.
11910	22.5	179.79	427.10	04:55:00 a.m.
12997	27	180.45	466.06	05:25:00 a.m.
14341	31.5	181.19	514.28	06:00:00 a.m.

Cabe decir que los ensayos experimentales tienen la finalidad de evaluar el comportamiento dinámico del tramo del río Madre de Dios “La Pastora” con la implementación de los Esquemas de diseño de los espigones (permeabilidad, orientación, espaciamiento y longitud de trabajo); y no su estabilidad estructural como ya se ha mencionado anteriormente. Por ende, los espigones fueron fijados al lecho de tal forma que no se desplazaran durante los ensayos (ver título 3.4.1.3).

El estudio se realizó con la simulación del hidrograma de avenidas para un periodo de retorno de 50 años, que representó el periodo de retorno utilizado para elaborar los esquemas de diseño (ver Tabla 3.29).

La secuencia seguida para todas las pruebas es la siguiente:

- Escaneo del lecho para obtener datos de forma del lecho, un día antes de iniciar el ensayo (Solo se realizó en una oportunidad para el primer ensayo).
- Se inicio el ensayo con la puesta en marcha de las bombas y con la abertura de válvulas. Se dejó pasar un caudal bajo por el modelo y se fue incrementando gradualmente para no erosionar el lecho. Este caudal era controlado continuamente con la ayuda de los vertederos, limnímetros y válvulas asegurando la reproducción del hidrograma.
- Al mismo tiempo en que se pone en funcionamiento el modelo y durante todo el ensayo se le va calibrando con ayuda del punto C-1.
- Una vez se llegó al caudal pico y se empezó a realizar las mediciones respectivas. Los datos recolectados son:
 - Mediciones de tirantes del río.
 - Mediciones de velocidades del flujo en tres direcciones.
- Culminadas las mediciones se guardan los equipos, se van apagando las bombas y se regula el flujo de forma gradual para evitar un cambio brusco en la morfología del lecho.
- Después de haberse escurrido toda el agua se realizan trabajos de escaneo del lecho. (Se hizo en todos los ensayos).

3.4.2.1. Inicio de Ensayo

El ensayo se inició con la puesta en marcha de las bombas que alimentaron al modelo con flujo de agua a través de tuberías de 6" y 14" (4 en total) pasando por un control de su caudal antes de ingresar al canal del mismo. El caudal se controló mediante el uso de dos vertederos rectangulares de pared delgada sin contracción, el uso de dos limnómetros instalados al lado de cada vertedero y el control continuo de válvulas.

Los depósitos de cada limnómetro se encontraban conectados a sus respectivos tanques vertederos mediante mangueras para aprovechar el principio de vasos comunicantes. De esta forma, el nivel de agua de los tanques vertederos (nivel de carga H) puede ser medido en los depósitos de los limnómetros. El proceso requirió que se hiciera una calibración antes del inicio del ensayo.

La verificación de los caudales que ingresaban al modelo se basa en la teoría de medición de descargas con el uso de vertederos para el cual se tiene la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * C_d * L * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

- Q: Descarga [m3/s]
- Cd: Coeficiente de descarga [adimensional]
- g: gravedad [m/s2]
- H: Carga de agua respecto al nivel de cresta [m.]
- L: Longitud de la cresta del vertedero [m.]

Como el ensayo precisó que los caudales que envían cada vertedero sumen el total del establecido por el hidrograma (ver Tabla 5.6) para verificarlos se necesitó de conocer la carga de agua con respecto al nivel de cresta de cada uno.

$$H = \left(\frac{3}{2} * \frac{Q}{C_D * \sqrt{2g} * L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Los resultados de los cálculos para cada caudal (niveles de carga H) fueron corroborados en campo haciendo mediciones con la ayuda de los limnómetros. Cuando el nivel de agua no es el correcto debido al funcionamiento de las bombas o cuando se requiere cambiar de caudal, se hace un proceso de cierre y abertura de válvulas.

Finalmente, el volumen de agua que escurría de los vertederos era enviado primero a una poza de amortiguación y luego a una poza de transición para asegurar una transición gradual del flujo hacia el canal sin alterar el lecho bruscamente (Ver subtítulo 3.3.5).

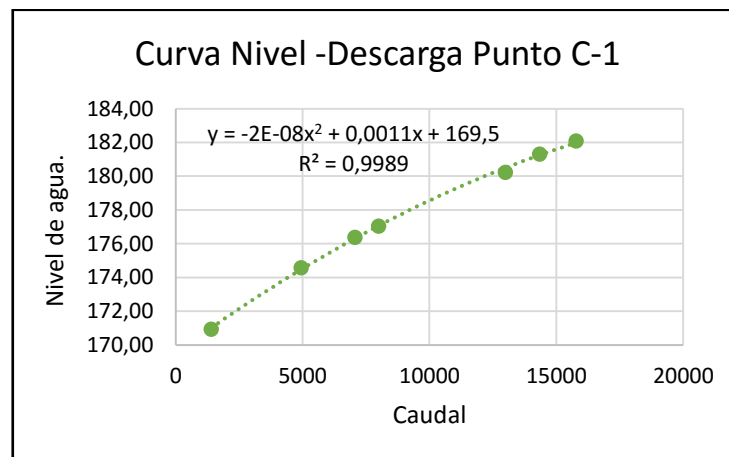


Figura 3.52. Curva Nivel de Tirante - Descarga para el punto C1.

3.4.2.2. Calibración del modelo:

Los modelos hidráulicos necesitan ser calibrados para asegurar la reproducción adecuada del fenómeno estudiado. Por lo tanto, la calibración del modelo físico de la Pastora es un paso fundamental para asegurar la calidad de los ensayos.

Se usó un punto de control llamado (C -1) que se estableció durante el proceso de diseño del modelo físico (ver subtítulo 3.3.4). Este punto disponía de una curva de nivel descarga que garantizaba la reproducción del flujo según el hidrograma de avenidas (Ver Figura 3.52). Mediante este punto se pudo ir operando el modelo asegurando que los cambios de niveles de agua correspondan al incremento gradual de sus respectivos caudales.

El punto C-1 estuvo materializado con una estaca de fierro con marcas graduales de nivel de agua para cada caudal ensayado. Se le ubicó en la margen derecha del río antes del inicio de la sección 1+200, como indicó el plano del modelo físico (Ver Figura 3.53). Su ubicación y niveles de agua fueron replanteados con el uso de una estación total.



Figura 3.53. Ubicación del punto C1 el modelo experimental.

Para lograr obtener los niveles de agua adecuados en el punto C-1 fue necesario regular las condiciones de entrada y salida del modelo. En la entrada del modelo se aseguró que el caudal enviado al canal sea el correspondiente al hidrograma; y al final del modelo, se adicionó o se redujo la cantidad de ladrillos que se encuentra al término del canal con el fin de elevar o disminuir el tirante. Este procedimiento fue realizado rigurosamente durante todo el ensayo asegurando de esta forma que las mediciones efectuadas sean las correctas.

3.4.2.3. Mediciones

Cuando se alcanza el nivel de caudal máximo 514.28 l/s que corresponde al periodo de retorno de 50 años se da inicio a las mediciones de tirantes de agua, velocidades y patrones de flujo. El tiempo que tomó este trabajo fue diferente para cada ensayo debido a la cantidad de datos obtenidos de cada uno. Las mediciones que más tiempo demandaron fueron las de toma de datos de velocidades en los ensayos con espigones, con una duración de casi 12 horas. Estos trabajos fueron coordinados con anticipación y contó con la participación de alrededor de 20 personas entre Investigadores, Estudiantes y Trabajadores del LNH; asignados a diferentes brigadas.

A. Mediciones de Velocidades

Los datos de velocidades del flujo es un parámetro importante para conocer la dinámica del río sin y con espigones. Además, nos permiten evaluar el desempeño de los espigones e ir ajustando su diseño tanto es su distribución en planta como en su análisis de su estabilidad.

Para medir las velocidades se estableció un plan de muestreo con el fin de tomar la mayor cantidad de datos relevante en cada ensayo. La metodología demandó establecer secciones de medición que fueran divididas en franjas verticales para poder utilizar sus aristas como ejes de medición. Se usaron

dos tipos de secciones con diferente orientación: las que son perpendiculares al alineamiento teórico del eje del río y secciones paralelas a los ejes de los espigones.

Las secciones perpendiculares al eje teórico del río fueron usadas para el replanteo del lecho del modelo físico y sus posiciones están marcadas sobre los muros laterales del canal. Se eligieron 11 secciones: 1 al inicio del canal (0+360), 9 en el tramo curvo y 1 al final del canal (4+320). Estas secciones fueron divididas en 9 franjas verticales de las cuales se tomarían solo mediciones sobre 6 ejes, con mayor cercanía en la margen derecha del río (ver Figura 3.54).

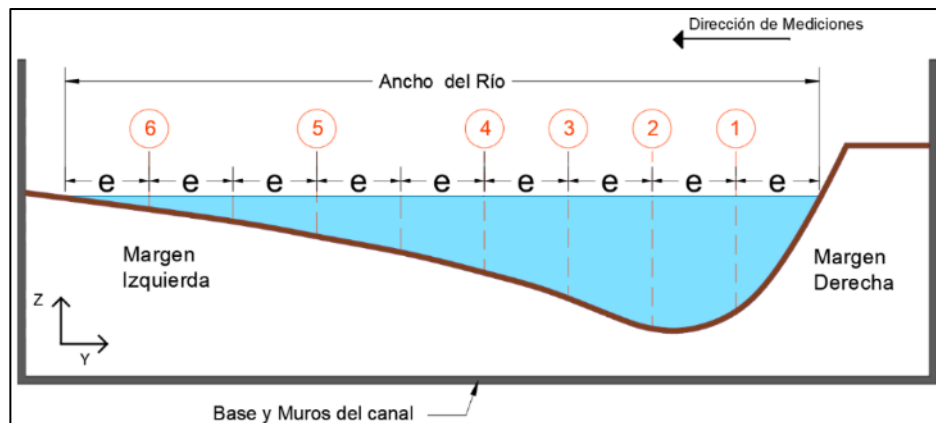


Figura 3.54. Esquema de medición de secciones perpendiculares al eje del teórico del río.

Las secciones de medición paralelas a los ejes de los espigones fueron 3 por espigón: sección aguas arriba, aguas abajo y en medio. Las secciones aguas arriba (ELJ-U) y aguas abajo (ELJ-D) del espigón, estuvieron separadas a 10 cm de la cara de inicio y final del espigón; y la sección en medio del espigón (ELJ-M) se ubicó propiamente en el eje del mismo.

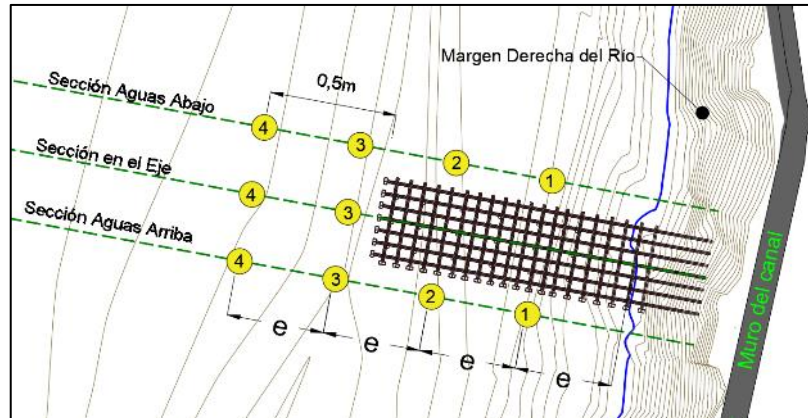


Figura 3.55. Esquema de mediciones para los espigones.

Se asignó una longitud de alcance de mediciones por espigón igual a la suma de su longitud de trabajo más 0.5 m. Esta longitud fue dividida en 4 franjas verticales eligiendo un total de 4 ejes de medición; con la finalidad de tomar datos con la mayor proximidad pero que permita visualizar cambios de velocidades importantes. En la sección media del espigón por razones de espacio, el Vectrino solo pudo realizar lecturas sobre 2 ejes (ver Figura 3.55).

El instrumento usado en la medición es el Vectrino Profiler que es un perfilador acústico que usa el efecto Doppler (ADV) para realizar mediciones del flujo de agua a unos pocos centímetros del sensor. La particularidad de este equipo es que mide la velocidad del flujo en 3 direcciones y la distancia de fondo hasta profundidades de 2m. Los datos pueden ser visualizados en tiempo real en una pantalla de pc mediante el software del mismo equipo "Vectrino 2" y pueden ser exportados a Matlab o Excel. Los datos de velocidades se muestran en forma de diagramas para cada dirección (X, Y y Z) con el valor de su velocidad media.

El equipo es un sonar biestático, es decir, que tiene su transmisor y receptores separados (4 en total). El Vectrino Profiler transmite pares cortos de pulsos de sonido, desde su transmisor principal, sobre un volumen de muestra de agua. Escucha a sus ecos mediante sus 4 receptores o transductores, y, finalmente, mide el cambio en tono o frecuencia del sonido devuelto usando su software. El cambio de tono o frecuencia te indica cuán rápido se está moviendo el fluido.

El sonido no se refleja desde el agua, pero sí de las partículas suspendidas en el agua. Estas partículas son comúnmente sedimento en suspensión y se mueven con la misma velocidad promedio que la del agua. La velocidad que es medida es consecuentemente la velocidad del agua. (Guía del usuario del Vectrino Profiler -Nortek, 2012)

El equipo tiene su propio sistema de coordenadas independientemente hacia donde apunte el Vectrino (Ver Figura 3.56). La dirección X+ está ubicada sobre un receptor con una marca de color rojo, la dirección Z+ va hacia al eje del equipo (alineada con el transmisor principal) y la dirección Y+ se determina por la regla de la mano derecha. Por lo tanto, la data que se obtenga estará supeditada a este sistema.

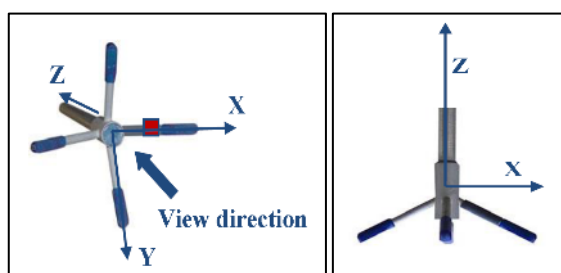


Figura 3.56. Sistema de coordenadas del Vectrino Profiler.

Fuente: Guía de usuario del Vectrino Profiler – Nortek.

La configuración que se le asignó al equipo antes de iniciar las mediciones fue tomar un volumen de muestra de 3.5 cm de alto, con una distancia al transmisor principal de 4 cm. La tasa de muestreo fue de 50 Hz y con un rango de velocidad de 1.0 m/s (Ver Figura 3.57). El algoritmo utilizado para ajustar automáticamente los intervalos de los pings(pulsos) y así reducir la interferencia acústica fue el “Adaptative Ping”.

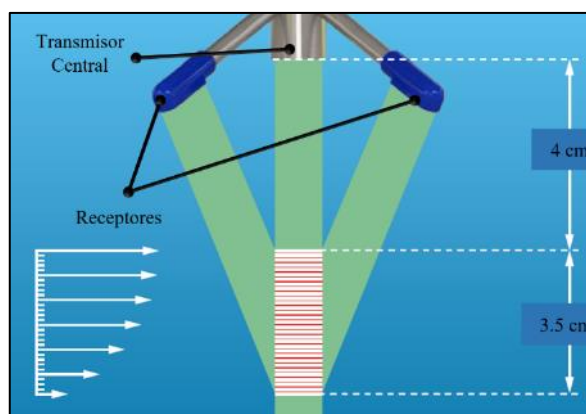


Figura 3.57. Localización del volumen de muestra configurado para los ensayos.

Modificado de: Guía del usuario de Vectrino Profiler- Nortek.

El Vectrino Profiler, como ya se ha mencionado, solo puede tomar datos a una corta distancia de sus sondas; y bajo la configuración asignada, lo puede hacer sobre un volumen de muestra de 3.5 cm. Por lo tanto, los perfiles de velocidades (en 3 direcciones) que resulten de un post-procesamiento alcanzan esta longitud. Para lograr un perfil de velocidades para un tirante de agua completo, se decidió ir tomando muestras consecutivas ascendentes desde el fondo del lecho (cada 3.5cm) hasta completarlo. Podemos mencionar que para obtener velocidades del flujo en dirección X positivas se ubicó al receptor con marca roja (dirección del eje X del equipo) en dirección del flujo.

Para realizar este trabajo en campo se tuvo la ayuda de 4 personas como mínimo, 2 operadores del Vectrino; y 2 ayudantes para movilizar el puente y el soporte del Vectrino (Ver Figura 3.58). Los trabajos siguieron el siguiente procedimiento:

- Ubicación del Puente metálico de 10 m de longitud con el soporte deslizante del Vectrino, sobre la sección a medir.
- Instalación del hardware del Vectrino. La cubierta electrónica se instala sobre el soporte del Vectrino y las sondas del Vectrino se orientan con la dirección de su Eje X de coordenadas positivo en dirección del flujo. El cable alimentador y de señal se conecta a su fuente de energía y a la computadora personal.
- Comprobación del correcto funcionamiento del equipo (Prueba Check) y realización de la configuración de muestreo.
- Cálculo de las franjas para ubicar el espaciamiento de los ejes a medir. Se mide el ancho del río (para el caso de secciones perpendiculares al eje del río) o se mide la longitud del alcance de muestreo (para el caso de mediciones en los espigones); y se divide esta longitud entre 9 o 4 franjas según sea el caso.
- Toma de datos sobre cada uno de los ejes de medición de forma ascendente hasta alcanzar el perfil de velocidades para el tirante completo del río.



Figura 3.58. Manejo del equipo Vectrino Profiler durante ensayos. A la izquierda se manipula el equipo usando un soporte metálico, a la derecha se recopilan los datos.

B. Medición de tirantes del Río

Los registros de niveles de agua sobre la superficie del río nos permitieron conocer sus tirantes reales durante la fase de experimentación. A partir de estos datos se puede graficar correctamente las secciones del río y los diagramas de velocidades; y corroborar la obtención de los datos con el cálculo del caudal si fuera necesario. Del otro lado, podemos evaluar la elevación o descenso del nivel del agua que causan los espigones tanto aguas arriba como aguas abajo; y validar los cálculos de las fuerzas que generan su inestabilidad.

Los instrumentos utilizados son un nivel de ingeniero, una mira topográfica, un nivel de mano tubular; y el uso del puente metálico de 10 m de longitud. La brigada asignada a este trabajo consistía de un portador de mira, un operario y un ayudante.

El método consiste en determinar la altura de la superficie del agua del río con respecto a un nivel de referencia (Ver Figura 3.59). En nuestro caso el nivel de referencia era dado por el BM más cercano a la sección de medición. Las mediciones se realizaron sobre los puntos de intersección entre el plano de la superficie del agua y cada eje de medición (calculados durante la etapa de medición de velocidades). Los pasos realizados son similares a los utilizados en el replanteo topográfico del lecho (título 3.4.1.1) y la fórmula utilizada es la siguiente:

	$\text{Cot. Nivel de Agua}_m = \text{Cot. BM}_m + (\text{Lect. BM} - \text{Lect. pto})$
Lect. BM	: Lectura sobre el punto BM _m (m)
Lect. pto	: Lectura sobre el punto sobre el nivel del agua (m)
Cot. BM _m	: Cota del BM en modelo (m)
Cot. N. A _m	: Cota del punto sobre el nivel del agua (m)



Figura 3.59. Mediciones de niveles de agua. A la izquierda se manipula la mira topográfica apoyándose sobre el puente metálico de 10 m de longitud, y a la derecha se hacen las lecturas correspondientes con el nivel de ingeniero.

3.4.2.4. Finalización del ensayo

Luego de realizar todas las mediciones se culmina con la fase de experimentación. Se evacua el agua del modelo físico de forma gradual con el fin de no provocar cambios drásticos sobre la morfología del río. Cada una de las 4 bombas son apagadas manualmente de forma sucesiva interrumpiendo la recirculación del flujo.

Los instrumentos de medición son guardados en el almacén del LNH y la data obtenida es almacenada en un ordenador para su post procesamiento.

3.4.2.5. Escaneos del Lecho (Medición de cambios morfológicos)

La medición de cambios morfológicos del río con y sin estructuras es necesaria para evaluar el desempeño de los espigones. En esta tesis, los espigones fueron diseñados con el objetivo principal de evitar que la margen derecha del río Madre de Dios en la zona La Pastora, sea afectada por erosión acelerada. Para cumplir este objetivo los espigones deben fomentar la sedimentación en la zona de campo de trabajo de estas y; al mismo tiempo, evitar que se presente una erosión significativa en la punta de los mismos que ponga en riesgo su estabilidad.

Los cambios morfológicos (Agradación o degradación) pueden ser medidos comparando la forma inicial del lecho antes de iniciar el ensayo (batimetría inicial) con la forma del lecho después de su ejecución (batimetría final), ambas para las pruebas con espigones y sin espigones.

Los datos de batimetría o de nivel del lecho fueron capturados, en una fotografía tridimensional basada en una nube de millones de puntos, utilizando un escáner 3d (Focus3D X 330). Los datos fueron proporcionados en un mismo origen de sistema de coordenadas en el formato digital de terreno “stl”, con el fin de permitir su comparación. La empresa contratada para realizar este servicio fue “INCAD Service Ingeniería Internacional” cuyo contrato involucraba las siguientes etapas:

Tabla 3.30. Etapas del servicio de escaneo.

ETAPA	DESCRIPCIÓN
1	Levantamiento en campo con láser escáner 3D. (1 a 2 horas)
2	Armado y depuración de nube de puntos.
3	Exportación a formato requerido para el estudio.
4	Envío de información para el estudio.
5	Reunión para la revisión de resultados.

El número de escaneos realizados por la empresa fue de cinco, uno para la condición de lecho sin ensayar y las otras cuatro después de los ensayos 3,4,5 y 6. El procesamiento de data en formato stl requiere la utilización de una multiplataforma de código abierto que consuma poco recurso de memoria RAM (Ver Figura 3.60). Esto, debido a la falta de recursos económicos del proyecto para adquirir un software de código cerrado que permita la trabajabilidad de la densa nube de puntos que resulta de obtener datos con una precisión milimétrica de ± 2 mm.

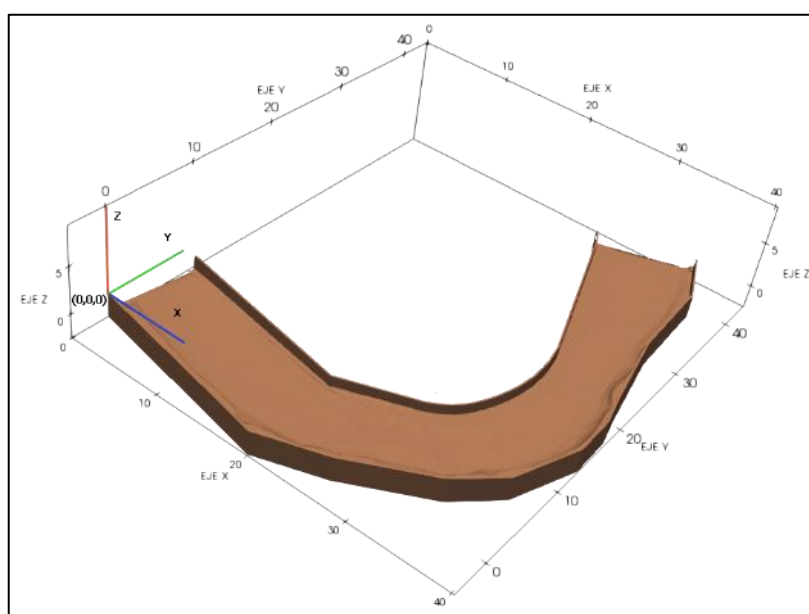


Figura 3.60. Visualización de la batimetría del lecho de Ensayo N°4 utilizando el software ParaView.

3.4.3. Trabajos de procesamiento de datos

3.4.3.1. Datos de batimetría (mediciones de cambios morfológicos)

Una vez obtenidas las batimetrías de cada ensayo experimental (en formato stl y bajo un mismo sistema de coordenadas), se realizó su procesamiento con el fin de analizar los cambios morfológicos (agradación o degradación) que resultaban de cada ensayo. Para lograr dicho análisis, fue necesario comparar sus batimetrías de forma cuantitativa y cualitativa.

Los dos principales Softwares utilizados en esta tarea fueron ParaView y FreeCAD para la plataforma de Windows 10. Estos softwares libres tienen la capacidad de visualización y procesamiento de datos en formato stl y no requiere un alto consumo de memoria RAM. Los otros dos softwares utilizados son Microsoft Excel y AutocadCivil 3d.

La comparación cualitativa solo requiere la visualización de las batimetrías de a dos, superponiéndolas una a otra, bajo un mismo sistema de coordenadas en un orden establecido. Para lograrlo, fue necesario cargar los archivos stl al software ParaView, y editar sus características de visualización que permitiera diferenciarlos (ver Figura 3.61).

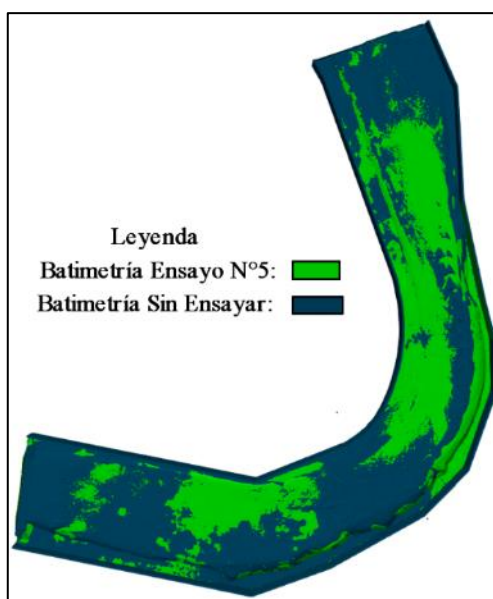


Figura 3.61. Comparación cualitativa de Batimetría Sin Ensayar y la del Ensayo N°5.

Del otro lado, en la comparación cuantitativa, se requiere secciones topográficas para comparar un estado inicial del lecho sin espigones con un estado final del lecho con espigones. Al contrastar las secciones, se puede observar y cuantificar el grado de sedimentación o erosión que ocurrió sobre estas (Ver Figura 3.62).

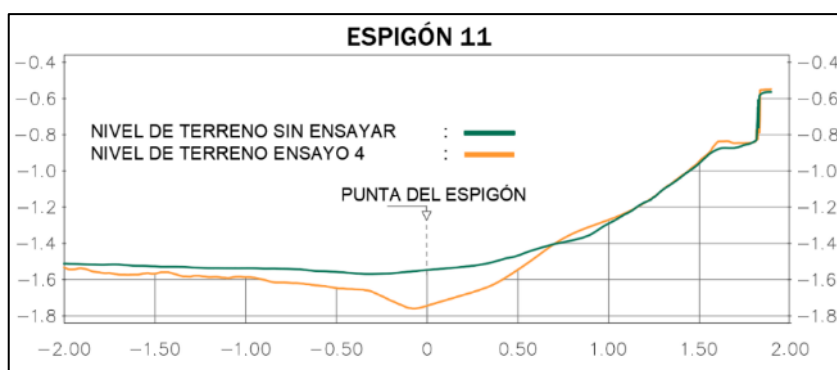


Figura 3.62. Comparación topográfica (espigón 11) de la Batimetría Sin Ensayar y N°4.
Batimetría sin Ensayar (color verde) y Batimetría del ensayo 4 (color naranja).

Las secciones topográficas se obtienen de utilizar planos de corte vertical sobre las batimetrías de los ensayos 3, 4, 6 y de la batimetría sin ensayar. Estos planos tienen su origen en las secciones transversales utilizadas para realizar los trabajos de medición de velocidades durante cada ensayo experimental con espigones. Son 3 secciones de medición por espigón que completan un total de 36.

El procedimiento de trabajo tiene los siguientes pasos:

- Crear planos de corte vertical en AutoCAD y convertirlos en sólidos 3d.
- Cargar los archivos en extensión stl, de la batimetría y de los planos de corte, al software FreeCAD.
- En el escenario Mesh Design recortar la malla guiándose por los planos de corte.
- Transformar la malla en puntos y exportarlos en formato Txt.
- Cargar el archivo a Civil3d, crear grupo de puntos y crear superficie.
- Cargar el archivo inicial de los planos de corte de AutoCAD y a partir de estos crear alineamiento y Samples Lines.
- Finalmente se crean las múltiples vistas en civil 3d para una edición final.

3.4.3.2. Datos de velocidad (mediciones de cambios de velocidad del flujo)

Como se mencionó en el subtítulo 3.4.2.3 toda la información de velocidades es procesada en el software del Vectrino (Vectrino 2) y exportada en archivos con extensión Matlab. A partir de este punto, el procesamiento de velocidades consistiría en convertir toda esta información en perfiles de velocidades (En las direcciones de X, Y y Z) para cada diferente eje de medición usando los softwares Matlab y Excel.

Al Vectrino en su configuración inicial se le asignó obtener datos de velocidades para un volumen de muestra de 3.5 cm a una tasa de muestreo de 100 hz hasta completar la cantidad de data de muestreo de 50. Esto supone cientos de datos recopilados en dirección X, Y y Z para un solo volumen de muestra. Además, para lograr obtener velocidades para todo un tirante del río, se decidió ir tomando muestras consecutivas ascendentes de 3.5 cm desde el fondo del lecho hasta acercarse a completarlo. Cabe decir que son 14 las secciones donde se tomó datos y por cada sección hay 6 ejes de medición (tirantes). Desde esta perspectiva la cantidad de datos de todo un ensayo supone decenas de miles de mediciones que requieren un preprocesamiento antes de obtener perfiles de velocidades.

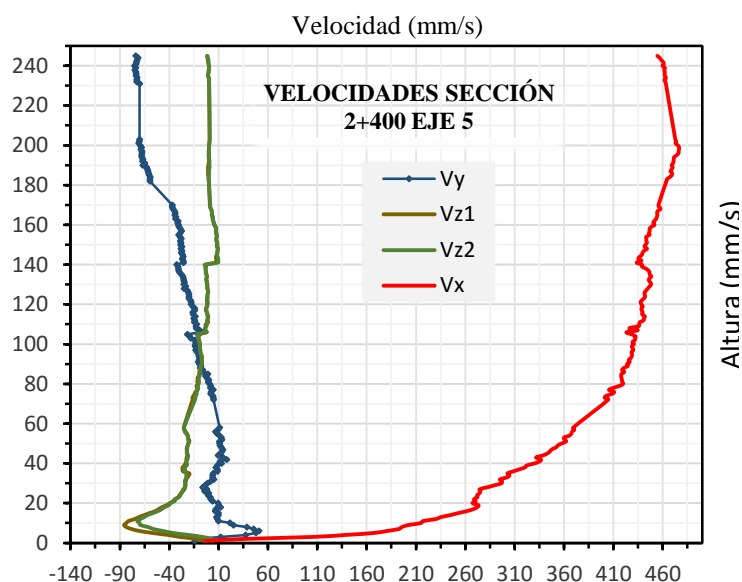


Figura 3.63. Perfil de velocidad en un eje de medición en tres direcciones (X,Y y Z).

Se utilizó el programa Matlab para realizar una depuración de cantidad de puntos y sobre estos realizar un promedio de velocidades a cada 1 mm de altura. Esto nos permitió completar los datos para cada eje de medición (tirante) en cada respectiva dirección (Y,Z y X). Luego los datos serían exportados en formato csv para su edición en Excel.

Los datos son ordenados por Numero de ensayo, sección y eje de medición para luego ser graficados uno a uno en perfiles de velocidad en sus tres direcciones Y,X y Z (ver Figura 3.63). Por lo general los gráficos tienen algunos saltos en el valor de velocidad producto de los ruidos a la hora de tomar la data con el Vectrino Profiler, con el fin de solucionarlo también se le realizó un trabajo de despeaking.

En el trabajo de análisis de velocidades se necesitarán comparar los ensayos experimentales con y sin espigones para identificar los cambios en la dinámica del fluido. Así mismo, también se presentarán las velocidades registradas en la punta del espigón en cada alternativa de diseño para ver el grado de concentración de flujo. La forma de presentación no será a través de diagramas de velocidades sino a través de vectores de velocidades y Tablas de valores de velocidad media del flujo. Esta velocidad media se calculó con el método de la integral.

3.4.3.3. Registro de niveles de agua

El procesamiento de los registros de niveles de agua tiene como fin obtener los tirantes reales en cada eje de medición. A partir de estos datos se puede graficar correctamente las secciones del río y por ende los diagramas de velocidades, corroborar la precisión de la toma de datos y validar los cálculos de las fuerzas que generan la inestabilidad del espigón.

Las lecturas de los niveles de agua se realizaron sobre los puntos de intersección entre el plano de la superficie del agua y cada eje de medición (utilizados en la etapa de toma de velocidades). Estos datos fueron recopilados en el modelo físico y están en una escala 1/60.

Para obtener los tirantes del río es necesario restar el nivel de la superficie del agua menos el nivel de lecho. Sin embargo, la topografía utilizada se encuentra en escala real y difiere de los datos recopilados en campo. De modo que, para realizar el procedimiento mencionado, fue necesario trasladar las lecturas de modelo a prototipo (Ver Tabla 3.31).

Tabla 3.31. Esquema de obtención de Tirantes de agua para una sección típica.

Sección	Nivel de agua	Cota de terreno	Tirante	Tirante
Orilla (Derecha)	177.239 m	177.239 m	0.000 m	0.000 m
P1	176.039 m	165.369 m	10.670 m	0.178 m
P2	175.319 m	164.861 m	10.458 m	0.174 m
P3	174.839 m	165.746 m	9.093 m	0.152 m
P4	174.839 m	167.459 m	7.380 m	0.123 m
P5	174.599 m	168.500 m	6.099 m	0.102 m
P6	175.439 m	170.214 m	5.225 m	0.087 m
Orilla (Izquierda)	176.999 m	176.999 m	0.000 m	0.000 m

El software utilizado para procesar toda esta información es Microsoft Excel 2016 para el sistema operativo de Windows 10. El trabajo solo requirió de realizar un proceso de gabinete topográfico y un proceso de escalamiento; para finalmente ordenar la información de cada eje de medición por secciones y por cada ensayo experimental.

3.4.4. Conversión de datos de modelo a prototipo

Los trabajos de procesamiento de datos se enfocaron sobre la data de topografía, velocidades, y registro de niveles medidos durante los ensayos experimentales. Esta data posee pequeños valores porque fueron obtenidos de un modelo.

Aun cuando el fenómeno físico reproducido a escala (modelo) representa dinámicamente al prototipo; el diseño ejecutado precisa evaluar el comportamiento de las estructuras a nivel de prototipo. La evaluación del desempeño de los espigones se realizará en la etapa de análisis y discusión de resultados y requiere que los datos procesados deban ser trasladados de modelo a prototipo.

Los datos que toman real importancia en el análisis de resultados son los de características geométricas (morfología y tirantes) y velocidad, que son un indicador del comportamiento funcional de los espigones dentro del cauce. Para trasladarlos se utilizan los factores de escalas que resultan de la etapa de modelamiento físico (ver Tabla 3.17). Las escalas empleadas son $\lambda_l = 60$ y $\lambda_v = 7.746$ para la geometría y velocidad correspondientemente. El procedimiento solo requirió multiplicar estos factores por la magnitud escalar en modelo para obtenerlos en prototipo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El procedimiento de diseño de los espigones es un proceso iterativo y de toma de decisiones que requiere poner a prueba diferentes alternativas o propuestas de diseño hasta lograr la que mejor solucione la problemática de inicio a todo el diseño. Siendo primordial, para el proceso, entender el comportamiento natural del río.

En la etapa experimental se puso a prueba la batimetría del río sin estructuras y con estas, en un total de seis ensayos experimentales. De los cuales queda excluido del análisis de resultados el Ensayo N°1. La razón de esta decisión y la descripción de cada una de las condiciones de cada ensayo fueron mencionadas en el capítulo anterior. Dos ensayos tienen como objetivo entender el comportamiento del río sin estructuras; y los tres restantes, evaluar las tres alternativas de diseño formuladas para esta tesis. El análisis de resultados enfocado en los cambios morfológicos e hidrodinámicos de ambas condiciones, permite ajustar las alternativas de diseño.

Cada alternativa de diseño es consecuencia de: analizar los resultados de las alternativas anteriores, encontrar las fallas y proponer una solución mejorada. Por lo tanto, describir las alternativas de diseño y los resultados de su ensayo experimental de forma separada; no sería lo mejor para poner en contexto el proceso de diseño que es objetivo de esta tesis.

En una primera instancia, se realizará un análisis de resultados de los ensayos sin estructuras que nos permitirá entender el comportamiento del río en su estado natural como se mencionó anteriormente. Luego se hará el análisis de los ensayos con estructuras que son en total 3. El cual consiste de los siguientes pasos; se describirá la alternativa de diseño, se presentará los resultados y se hará una discusión sobre ellos. La discusión tendrá como consecuencia la siguiente alternativa de diseño.

Cabe mencionar que existen variantes con respecto a la geometría de los espigones y su disposición para cada alternativa de diseño, las cuales serán descritas en este capítulo. Así mismo, el análisis de los resultados está enfocado principalmente a los datos en prototipo de los 5 ensayos experimentales correspondientes a sus batimetrías, velocidades y tirantes.

4.2. ENSAYO SIN ESTRUCTURAS

Los datos que se utilizaron para el análisis fueron los correspondientes al Ensayo N°2 y N°5 que se llevaron a cabo el día 22 de setiembre del 2016 y el día 25 de enero del 2017. El caudal para el Ensayo N°2 fue de 12997 m³/s y para el Ensayo N°5 fue de 14341 m³/s correspondientes a un caudal en modelo de 466 l/s y 514.28 l/s. El hidrograma de avenidas ensayado fue para un periodo de retorno de 50 años.

Principalmente se analizaron los datos de velocidades y de batimetría para los ensayos mencionados, así como también para los datos de batimetría para una condición de lecho virgen (sin ensayar). Además, se presentan en tablas y sobre las secciones topográficas el nivel de tirante de agua del ensayo N°5 (referenciado al nivel medio del mar).

Los datos de velocidad y tirantes se obtuvieron sobre 11 secciones identificadas dentro del modelo que son un factor común para todas las mediciones de velocidad de todos los ensayos experimentales. Estas once secciones fueron ubicadas de modo que se registraran datos al inicio y final del modelo y con mayor detalle en la zona curva de él. Las secciones fueron divididas en 6 ejes de medición; espaciados en igual longitud para el ensayo 2 (longitud de la sección dividida entre 7) y para el ensayo 5 (longitud de la sección dividida entre 9); como se aprecia en la Figura 3.54.

Las secciones usadas para las mediciones son algunas de las secciones topográficas usadas para el replanteo y que fueron elegidas estratégicamente para obtener datos sobre ellas. Se les asignó una denominación que las enlaza con el número de experimento en que se realizó y que nos ayuda a analizar los resultados sin perder su procedencia (ver tabla 4.1). Las secciones y sus ejes en particular

son fundamentales porque sobre estos se presentarán los resultados de los datos de velocidades y de morfología a modo de perfil o en planta.

Tabla 4.1. Denominación de las secciones para el ensayo N°2.

# Ensayo	Progresiva	# Sección	Denominación
Experimento N°2	0+360	1	EX02-01
	1+200	2	EX02-02
	1+440	3	EX02-03
	1+680	4	EX02-04
	1+920	5	EX02-05
	2+160	6	EX02-06
	2+400	7	EX02-07
	2+640	8	EX02-08
	2+880	9	EX02-09
	3+120	10	EX02-10
	4+320	11	EX02-11

Podemos especificar que los estudios básicos del tramo del Río denominado la pastora que fueron necesarios para el diseño y el proceso de modelamiento físico de los mismos fueron explicados en el capítulo 3 y 4 respectivamente de tal forma que en este título solo se explicaran los resultados obtenidos de ellos.

4.2.1. Análisis de datos de Velocidades Sin estructuras

Los resultados se muestran en tablas de valores numéricos de velocidades medias para cada eje de medición sobre su respectiva sección en prototipo. La velocidad media que se presenta es calculada mediante el método de la integral usando los datos de los perfiles de velocidades en las direcciones X, Y Z. Del otro lado, se presentan estas velocidades en su forma vectorial, proyectadas sobre el plano XY, describiendo de forma gráfica el patrón del flujo para estos ensayos.

La dirección de estos vectores se encuentra bajo el sistema de coordenadas asignado durante la puesta en campo del Vectrino Profiler (ver subtítulo 3.4.2.3). Dicho sistema fue colocado deliberadamente, indicándonos valores positivos de x en dirección del flujo, valores de y positivos hacia la margen derecha del río y valores de z positivos hacia el eje del instrumento de medición.

4.2.1.1. Ensayo N°2 ($Q_{\text{Ensayado}} = 12997 \text{ m}^3/\text{s}$)

Una visión general de los patrones de flujo se ha representado en la Figura 4.1. En esta figura los vectores de velocidad con mayor valor han sido colocados de color rojo para indicarnos de qué lado del cauce se están presentando las mayores velocidades.

Los vectores de velocidades medias nos indican un patrón que es característico para flujo en curvas. El flujo ingresa en un tramo recto y posee velocidades mayores hacia la margen izquierda como se aprecia entre la sección EX02_1 hasta la sección EX02_03. Hacia la sección EX02_04 a EX02_06 el flujo ha ingresado hacia la zona curva del cauce y comienza gradualmente a cambiar sus velocidades con magnitudes mayores hacia el centro del mismo. Dentro de la zona curva entre las secciones EX02_07 a EX02_10 el flujo es acelerado hacia la parte cóncava. Finalmente, a la salida del cauce en la sección EX02_11 el flujo posee mayores magnitudes de velocidad hacia el centro del mismo.

Como apreciamos en la tabla de velocidades medias los valores máximos (3.15 m/s a 3.71 m/s) se dan entre las secciones EX02_7 a EX02_10 que pertenecen a la zona cóncava (margen derecha del río); del otro lado las velocidades mínimas con valores menores a 1 m/s se dan del lado de la margen izquierda (llanura de inundación) entre las secciones EX02_6 y EX02_11, con valores entre 0.03 m/s a 0.63 m/s .

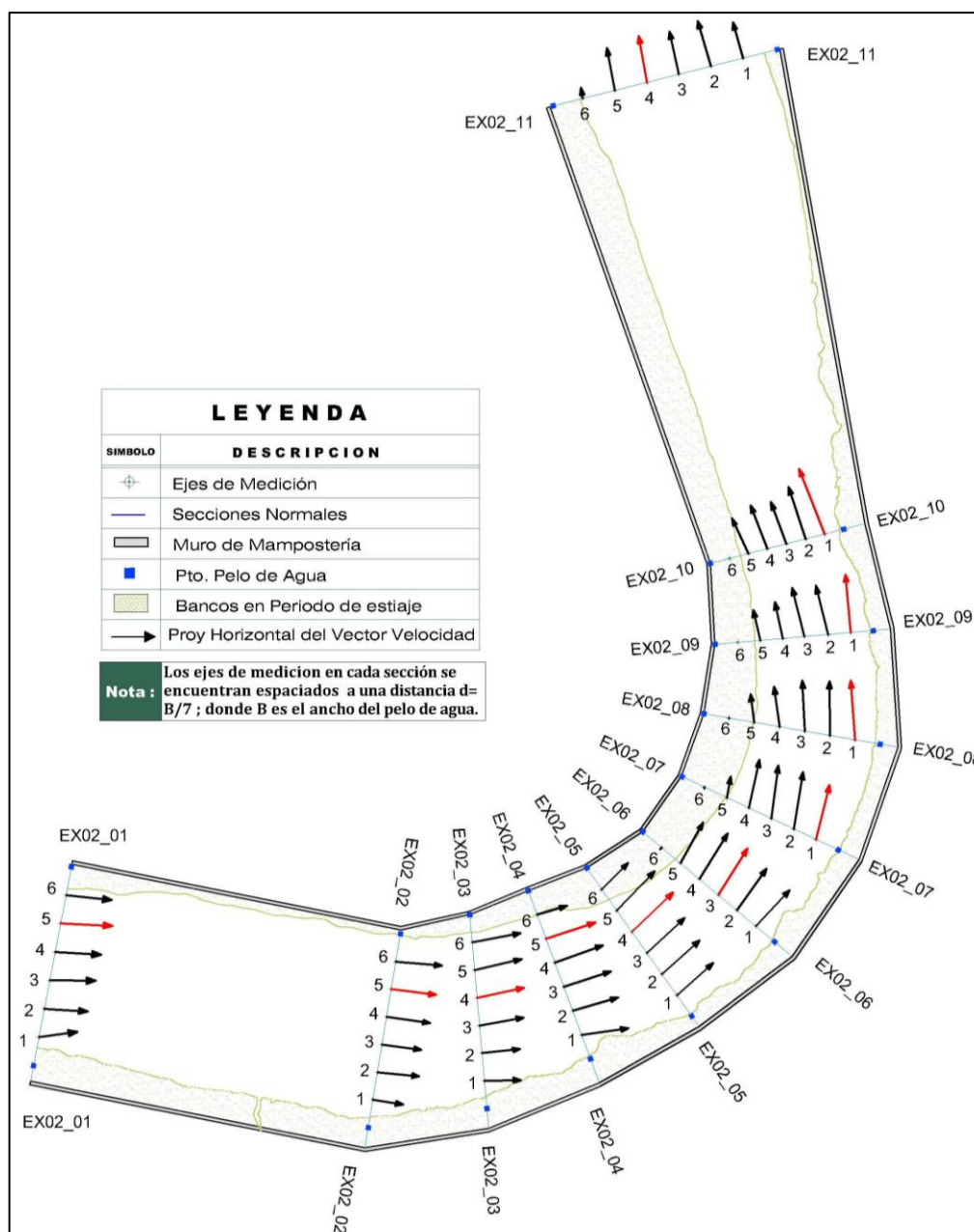


Figura 4.1. Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo N°2.

Tabla 4.2. Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el ensayo N°2.

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX02_1	2.10	2.39	2.69	2.56	2.82	2.39
EX02_2	1.70	2.31	2.13	2.45	2.48	2.35
EX02_3	1.94	2.06	2.36	2.70	2.58	2.45
EX02_4	2.51	2.63	2.71	2.85	2.91	2.18
EX02_5	2.50	2.71	2.84	3.09	2.96	2.30
EX02_6	2.62	2.76	2.96	2.84	2.61	0.32
EX02_7	3.15	3.11	3.05	2.86	1.94	0.21
EX02_8	3.15	2.91	2.81	2.39	2.04	0.27
EX02_9	3.25	2.73	2.61	2.21	1.82	0.03
EX02_10	3.71	2.96	2.62	2.59	2.19	0.19
EX02_11	1.99	2.46	2.29	2.50	2.22	0.63

4.2.1.2. Ensayo N°5 ($Q_{\text{Ensayado}} = 14341 \text{ m}^3/\text{s}$)

Los vectores de velocidades medias muestran un patrón similar al Ensayo N°2. En la Figura 4.2 los vectores con mayor valor han sido colocados de color rojo para indicarnos de qué lado del cauce se están presentando las mayores velocidades. En este ensayo los ejes de medición difieren en espaciamiento a los del ensayo N°5; sin embargo, la descripción del comportamiento del flujo a partir de los vectores de velocidad resulta ser el mismo.

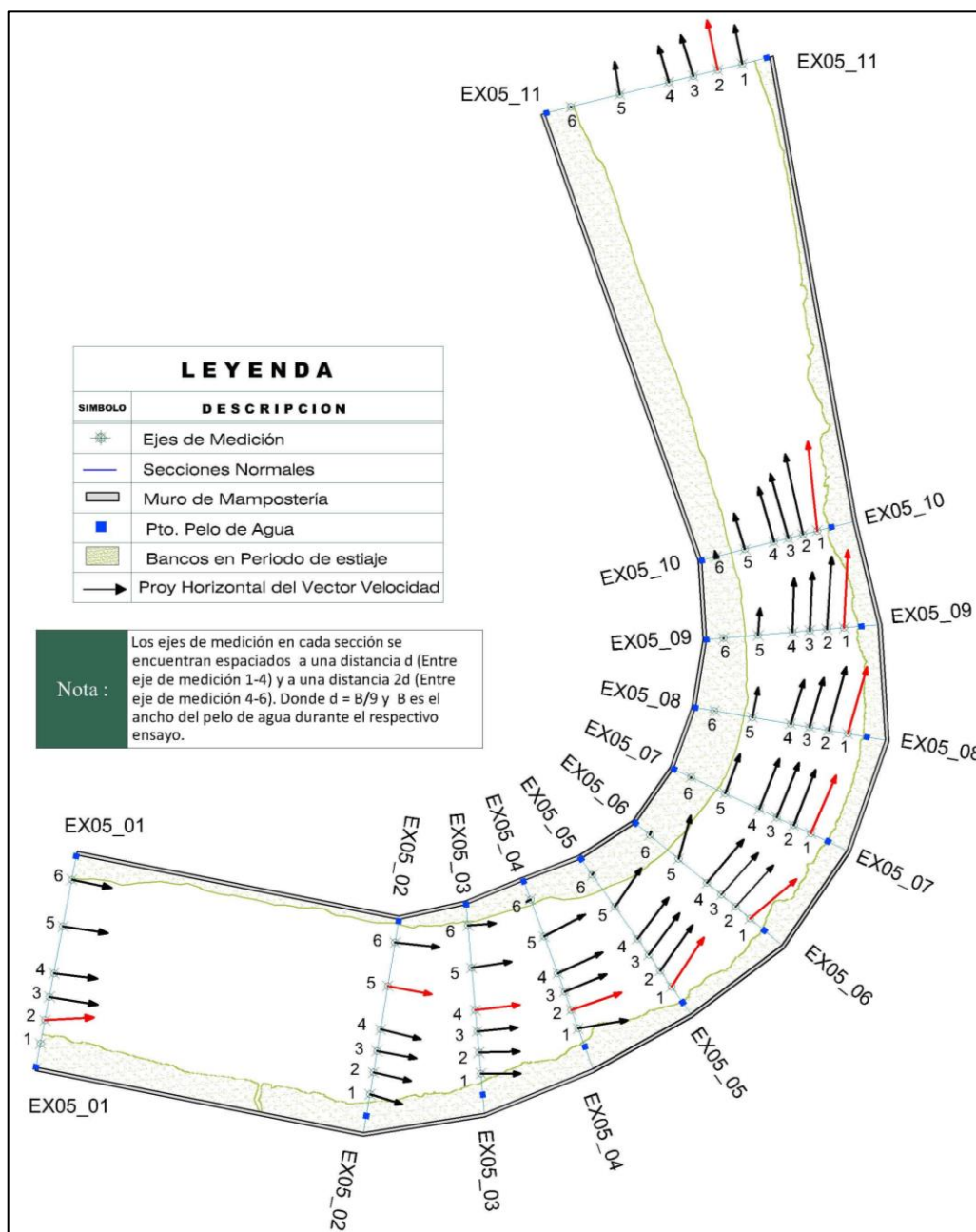


Figura 4.2. Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo N°5.

En la Figura 4.2 podemos notar un incremento de la magnitud vectorial de velocidad con respecto al ensayo N°2. El flujo ingresa en la sección EX05_1 con velocidades ligeramente mayores en la margen derecha del cauce y alcanza la sección EX05_2 con velocidades de flujo ligeramente mayores del lado de la margen izquierda. Hacia la sección EX05_3 el flujo está ingresando hacia la zona curva con magnitudes mayores de velocidad hacia el centro del cauce; y paulatinamente hacia las secciones EX05_04 a EX05_06 el flujo se va acelerando hacia la margen derecha. Dentro de la zona curva entre las secciones EX05_07 a EX05_10 el flujo es acelerado hacia la parte cóncava.

Finalmente, a la salida del cauce, alcanzando la sección EX05_11 el flujo recorre un tramo recto, las magnitudes vectoriales decrecen en la margen derecha; y aumentan hacia el centro del cauce.

También se puede observar, que las direcciones de los vectores de velocidad media se mantienen de forma paralela al cauce del río en los tramos rectos de entrada y salida del cauce, EX05_1 a EX05_2 y EX05_10 a EX05_11. Mientras que, en la zona curva EX05_3 a EX05_6, los vectores de velocidad toman direcciones aleatorias hacia la margen izquierda y derecha indicando un flujo helicoidal; y en la zona EX05_6 y EX05_9, los vectores parecen incidir de forma directa hacia la margen derecha.

Tabla 4.3. Valores numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el ensayo N°5

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX05_1	0.01	2.60	2.59	2.31	2.30	2.16
EX05_2	1.80	2.05	2.10	2.18	2.37	2.35
EX05_3	2.09	2.14	2.24	2.36	2.13	1.25
EX05_4	2.64	2.80	2.41	2.61	2.46	0.25
EX05_5	3.10	2.95	2.72	2.73	2.49	0.14
EX05_6	3.22	2.95	2.93	2.98	2.38	0.20
EX05_7	3.33	3.14	3.12	2.85	2.21	0.06
EX05_8	3.67	3.49	2.72	2.43	1.62	0.02
EX05_9	4.10	3.83	3.09	2.83	1.44	0.01
EX05_10	4.74	4.34	3.53	3.00	1.97	0.30
EX05_11	2.09	2.68	2.26	1.99	1.75	0.01

Así mismo, en la Tabla 4.3 observamos que las máxima velocidades medias se registraron pegadas a la margen derecha del río entre las secciones EX05_7 a EX05_10 con un valor máximo de 4.74 m/s correspondiente a la sección EX05_10. Los valores mínimos se presentan sobre la margen izquierda con valores que tienden a ser menores que 1 entre las secciones EX05_4 a EX05_11.

4.2.2. Análisis de datos de batimetría

El análisis de los datos de batimetría sin estructuras es de carácter cualitativo y está enfocado principalmente en la visualización de cambios morfológicos. Se dispone de 2 batimetrías para los ensayos sin estructuras, una que corresponde a la Batimetría sin Ensayar y la otra a la del Ensayo N°5 ($Q_{\text{Ensayado}} = 14341 \text{ m}^3/\text{s}$). Estos datos se encuentran bajo un mismo origen de sistemas de coordenadas y se presentan convenientemente en la escala del modelo físico.

La forma en que se visualiza los cambios morfológicos es a través de las vistas en planta y en secciones topográficas (ver Anexo13). Las vistas en planta muestran las batimetrías en forma de superficie sólida con su respectiva gama de colores vinculados a intervalos de profundidad. Mientras que en las secciones topográficas se observa en polilíneas los niveles del terreno que alcanzan las diferentes batimetrías.

Un primer análisis se realizó para visualizar la morfología del cauce en un estado inicial. A la Batimetría sin Ensayar se le aplicó una gama de colores de tonos marrones asociados a una elevación (ver Figura 4.3). Sobre el cauce las tonalidades marrón oscuras nos indican una mayor elevación y los colores con tonalidades cremas indican una menor elevación.

Sobre la Figura 4.3 los colores varían desde una tonalidad marrón oscura (0 m) pasando por un color mostaza (-0.8 m) hasta llegar a uno crema (-1.6 m). Los diferentes cambios de tonalidades nos muestran marcadamente las zonas de llanura de inundación del lado izquierdo, la zona de taludes del lado de la margen derecha y el cauce principal en el centro. El valor de elevación para el eje del cauce en la sección 1 y 11 (ingreso y salida) es de -1.47 m, lo cual nos indica una pendiente de fondo casi nula. Las elevaciones más bajas en el río corresponden a valores inferiores a -1.50 y se ubican entre las secciones 5 a 10 adyacentes al pie del talud de la margen derecha. Estas elevaciones se muestran de color crema e indican la ubicación del talweg para esta zona.

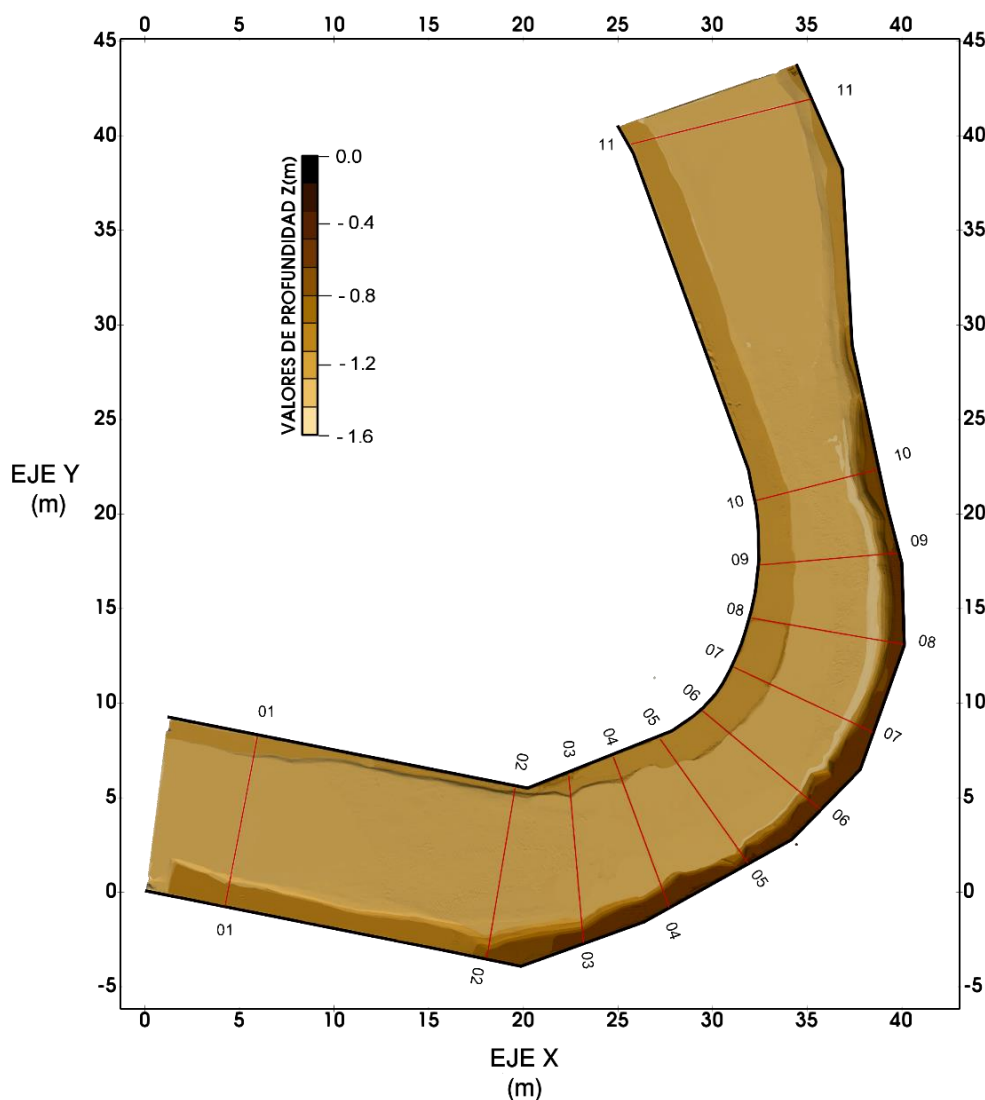


Figura 4.3. Gama de colores que indican profundidades de la Batimetría sin ensayar.

Un segundo análisis del tipo diacrónico se hizo para comprender los cambios en la geomorfología del río producto de sus fuerzas hidrodinámicas. El análisis consiste en visualizar zonas de agradación y degradación que resultan de comparar la Batimetría Sin Ensayar con la Batimetría del Ensayo N°5. Se usan las mismas secciones topográficas de medición de velocidades para obtener cortes de forma que se visualice los niveles de terreno (en polilíneas) de cada batimetría. Convenientemente se asignaron el color marrón oscuro a la batimetría N°5 y el color verde a la batimetría sin ensayar, para diferenciarlos.

Entre las secciones EX05_06 a EX05_10 existe una importante profundización del thalweg del lado de la margen derecha, al pie del talud. La profundización se genera por esfuerzos de corte y resulta en el traslado de su material hacia aguas abajo de la sección EX05_10. Los valores de profundización del thalweg resultan ser significativos y pueden apreciarse con más detalle al observar las secciones 8 y 10 (ver Figura 4.4). En estas imágenes la erosión logra alcanzar valores de hasta 11.5 cm que representaría en prototipo valores de hasta 6.9 m de longitud.

Así mismo en las secciones EX05_8 y EX05_10 (ver Figura 4.4) se observa el proceso de migración del meandro debido al flujo helicoidal. Del lado de la margen izquierda los sedimentos están depositándose mientras que del lado de la margen derecha ocurre la erosión. La erosión genera la inestabilidad de los taludes al hacer que aumente su inclinación y supere su ángulo de reposo. En la sección 10 en donde el ancho del río alcanza su menor longitud, el talud en la margen derecha retrocedió 11 cm que en prototipo representaría 6.6 m.

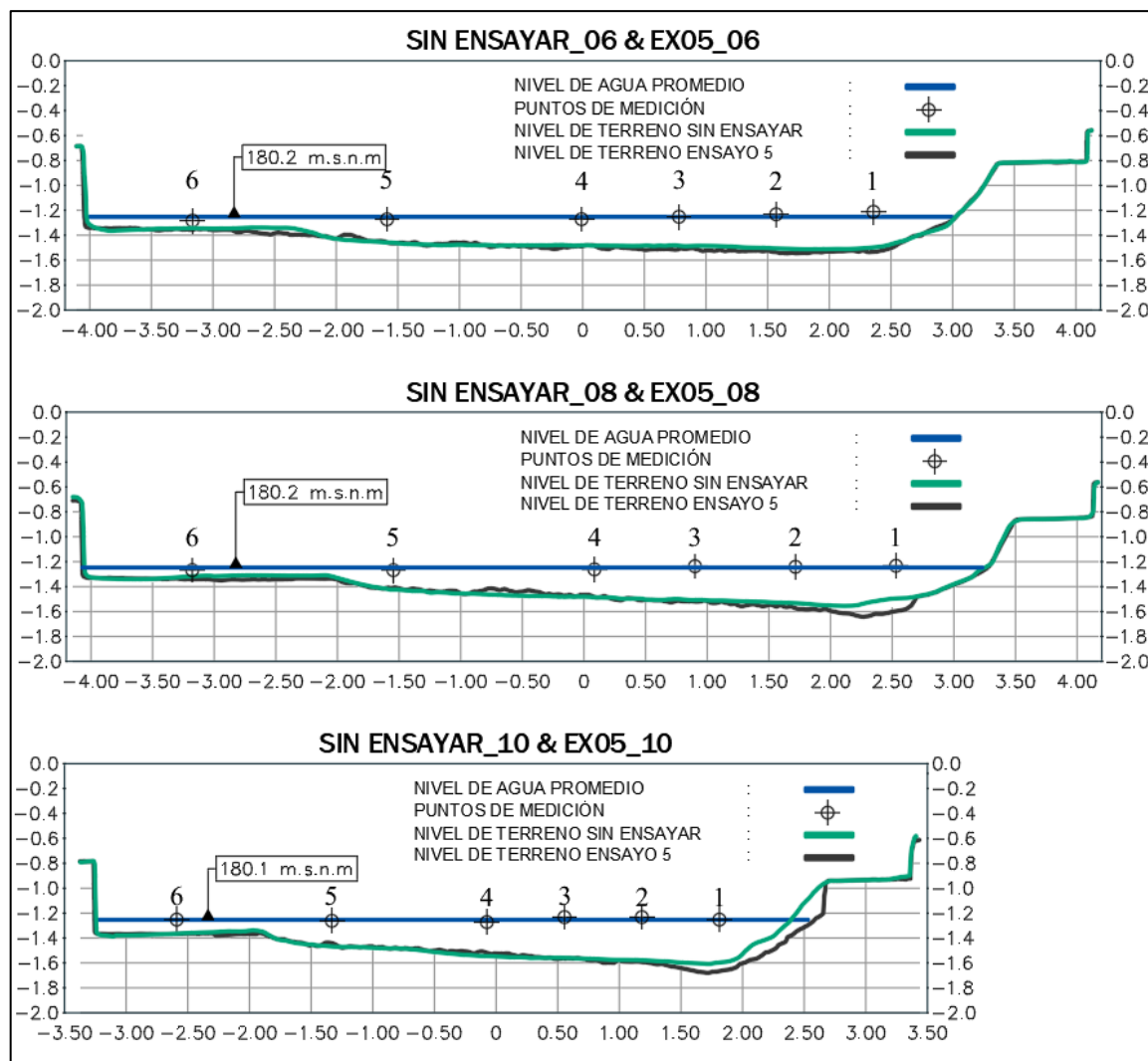


Figura 4.4. Comparación de secciones topográficas de la Batimetría N°5 y Batimetría Sin Ensayar.

4.2.3. Análisis de datos de Tirantes

El análisis de datos de tirantes está enfocado en encontrar los niveles de agua que determinan la elevación del diseño de los espigones. Para los ensayos sin estructuras se posee datos de tirantes para el ensayo N°5. En este ensayo se simuló un hidrograma de avenidas para un periodo de retorno de 50 años ($Q_{\text{Ensayado}} = 14341 \text{ m}^3/\text{s}$).

Los datos del nivel de agua máximos alcanzados y el valor promedio por sección se presentan en una tabla con los valores en m.s.n.m en prototipo. (ver Tabla 4.4) Así mismo las elevaciones promedio y la ubicación de lecturas en sus respectivos ejes de medición, son mostradas en las secciones topográficas utilizadas para comparar las Batimetrías del Ensayo N°5 y Sin Ensayar (ver Figura 4.4).

En la Tabla 4.4 los valores promedios para cada sección oscilan entre 179.1 y 181.2 m.s.n.m, correspondientes a las de salida EX05_11 y de entrada EX05_1. La diferencia de niveles entre la entrada y salida es de 2.1 m en una longitud de 4.32 km, ocasionado un pendiente de 4.861 E-04 . Por otro parte, en el tramo curvo del río EX05_2 a EX05_10, del lado de la margen derecha y hacia el eje de medición 1; se obtienen los valores máximos de elevación que oscilan entre los valores 182.3 y 180.8 m.s.n.m. Esto refleja el comportamiento típico del flujo en un meandro en donde los mayores niveles de elevación corresponden a la margen externa (zona cóncava). Finalmente, los valores máximos de elevación de tirantes representan el riesgo mayor para elaborar el diseño y, por lo tanto, deberían ser considerados para tal.

Tabla 4.4. Niveles de agua en prototipo (m.s.n.m) alcanzados en el ensayo N°5.

Sección	Lectura Máxima	Promedio por Sección	Posición Lect. Máxima
EX05_1	182.3	181.2	EJE 2
EX05_2	181.4	179.7	EJE 1
EX05_3	181.5	179.7	EJE 1
EX05_4	181.8	179.8	EJE 1
EX05_5	182.2	180.3	EJE 1
EX05_6	182.3	180.2	EJE 1
EX05_7	182.2	180.4	EJE 1
EX05_8	181.7	180.2	EJE 1
EX05_9	181.1	180	EJE 1
EX05_10	180.8	180.1	EJE 1
EX05_11	179.5	179.1	EJE 3

4.2.4. Discusión de resultados de ensayos sin estructuras

Los resultados obtenidos de los ensayos sin estructuras nos indican un comportamiento del flujo típico de un río meándrico. Las fuerzas hidrodinámicas generan esfuerzos importantes de corte y de traslado de material que repercuten directamente en la morfología del Río.

Al analizar los datos de velocidades tanto del ensayo 2 y 5 (ver Tabla 4.2 y Tabla 4.3) observamos un incremento de velocidad a lo largo de todo el cauce debido a un incremento del caudal. Ambos datos, uno en menor medida que el otro, nos indican un comportamiento del flujo propio de un tramo curvo en un río. En sus tramos rectos a la entrada y salida, las velocidades alcanzadas poseen magnitudes menores a 2.7 m/s para ambos ensayos. Pero en su zona curva y hacia la margen externa sufre un incremento importante en sus velocidades, con valores que alcanzan los 3.71 m/s para el Ensayo 2 y 4.74 m/s para el Ensayo 5.

Las velocidades mantienen una relación íntima con los cambios morfológicos (ver Tabla 4.3 y las Figuras 6.3 y 6.4). Los resultados nos indican un flujo ralentizado con velocidades menores 2.6 m/s entre las secciones 1 a 2 que favorece la sedimentación en esta zona. Una vez ingresa a la zona curva, entre la sección 2 a 5, se empieza a formar un flujo helicoidal con mayores velocidades en su dirección longitudinal y hacia la margen derecha alcanzando un valor máximo de 3.10 m/s. En esta zona se produce erosión y al parecer prevalece el traslado de material. Cuando alcanza la sección 6 el flujo transversal resulta ser de importancia y junto al flujo longitudinal generan un flujo helicoidal que logra erosionar la margen derecha y depositar los sedimentos a su margen izquierda hasta la sección 10. Al acercarse a la sección 10 el flujo se acelera por el estrechamiento del cauce y logra alcanzar velocidades de 4.74 m/s, la corriente transversal pierde fuerza y prevalece un flujo longitudinal. Entre el tramo 10 a 11, algunos sedimentos son depositados hacia aguas abajo y del lado derecho de la sección 10, cuyo depósito alude a una zona de alta turbulencia. Mientras el flujo alcanza la sección 11 posee mayores velocidades del lado de la margen izquierda menores a 2.7 m/s, favoreciendo primordialmente la erosión en este lado.

La erosión del lado de la margen derecha al pie del talud es la que genera la inestabilidad de los taludes ocasionando su colapso y favoreciendo el retroceso de esta margen. La instalación de espigones entre la zona 3 a 10 mermaría un flujo acelerado que favorecería la sedimentación. No obstante, los cambios en la morfología fluvial resultan muy complejos y al momento de la implementación de estas estructuras el comportamiento hidrodinámico y morfodinámico que se presentará cambiará significativamente y deberá ser analizado en los ensayos con estas estructuras ya colocadas.

Para plantear un primer esquema de diseño de los espigones debemos entender la posición del thalweg para a partir de este plantear acciones de rectificación. Entender el comportamiento de

migración nos dará un indicio para la localización de la nueva orilla virtual y la ubicación de espigones, y así no irrumpir drásticamente con la tendencia natural del río.

Finalmente, en el diseño de los espigones se debe tener en cuenta los resultados de tirantes, velocidades y secciones batimétricas del ensayo N°5; que ha sido ensayado con el hidrograma de avenidas para un periodo de retorno de 50 años. Los datos utilizados para el cálculo de la estabilidad deben ser los máximos registrados que implican las mayores solicitaciones para la estructura, pero deberán ser ajustados posteriormente en los ensayos con estructuras.

4.3. ENSAYOS CON ESTRUCTURAS

Se realizaron tres ensayos con estructuras que corresponden al tercer, cuarto y sexto ensayo. La fecha de realización de estos ensayos fueron el 27 de octubre de 2016, el 20 de diciembre 2016 y el 24 febrero de 2017. Usando un primer esquema de diseño se realiza el tercer ensayo y a partir del refinamiento de este se realizan los 2 restantes.

El caudal de los Ensayos 3 y 4 fue de 466 l/s (12997 m³/s en prototipo) mientras que el caudal del Ensayo 6 fue de 514.28 l/s (14341 m³/s en prototipo). Teniendo en cuenta lo mencionado, para el análisis comparativo de un ensayo con estructuras y sin estas, fue necesario relacionar aquellos que poseían las mismas condiciones de experimentación.

En un principio se describirá cada alternativa o esquema de diseño y luego se procederá a su análisis. Las características geométricas descritas fueron del esquema geométrico en sí y del diseño individual de cada espigón. Luego cada esquema de diseño fue analizado de tres formas; los cambios hidrodinámicos y morfológicos que produce sobre el cauce del río, la profundidad de socavación y velocidad media que se presenta en la punta de los espigones, y el nivel de elevación de diseño.

En el primer análisis, los cambios hidrodinámicos fueron cuantificados al comparar las velocidades medias del ensayo con estructuras y sin estructuras. Del otro lado, los cambios morfológicos (agradación y degradación) se describen cualitativamente al comparar las secciones batimétricas sin ensayar con la de estructuras. Toda esta información se presenta en patrones de flujo, velocidades medias, incrementos porcentuales de velocidad media, y secciones topográficas. Estos datos tienen un factor común con los datos de los ensayos sin estructuras al poseer las mismas secciones de medición.

En un segundo análisis, la profundidad de socavación y velocidad media en la punta de los espigones son un indicador del riesgo de estabilidad estructural. La profundidad de socavación resulta al medir la diferencia de niveles (al pie del espigón) entre la batimetría sin ensayar y la batimetría ensayada con estructuras. Mientras que las velocidades medias resultan de la integración de registros de velocidades sobre un eje de medición vertical localizado en las proximidades de la punta del espigón. La diferencia de niveles para obtener la socavación y el eje de medición de velocidades, se ubican sobre la sección transversal que atraviesa los espigones a su mitad.

En este mismo análisis, se evalúa si la elevación de diseño fue la adecuada. Se presentan en una tabla los niveles de diseño de los espigones y el nivel del tirante de agua alcanzado. Los niveles de agua fueron registrados a 10 cm aguas arriba del lado lateral del espigón.

4.3.1. Ensayo N°3 ($Q_p = 12997 \text{ m}^3/\text{s}$)

4.3.1.1. Características de la alternativa de Diseño N°1:

Esta primera alternativa de espigones fue diseñada para un periodo de retorno de 50 años con la particularidad que los espigones estuvieran sumergidos y alcanzaran un nivel de elevación correspondiente a un periodo de retorno de 25 años. De esta forma una menor cantidad de madera se encontrará expuesta a los factores climáticos durante el periodo de estiaje, y permitirá un flujo transversal que teóricamente minimizará la erosión lateral hacia el lado del talud. La disposición de los entramados de troncos para cada espigón difiere ocasionando permeabilidades que oscilan entre el 32% y 39%.

Tabla 4.5. Características geométricas de los 12 espigones del primer esquema de diseño.

# Espigón	Elevación (m.s.n.m)	Prof. Pilote (m.s.n.m)	Altura (m) Entramado	Ancho (m)	Empotramiento Longitud (m)	Permeabilidad (%)
1	180.3	152.3	19.0	15	3.0	32.8
2	180.9	152.9	18.5	15	3.6	35.3
3	180.9	155.9	16.1	15	3.3	36.4
4	181.8	158.6	16.3	15	3.8	36.6
5	180.9	151.3	19.7	20	4.4	36.5
6	180.8	151.3	22.1	20	5.4	38.4
7	180.8	150	22.1	20	6.0	36.2
8	180.2	149.9	22.7	20	6.0	37.9
9	180.2	149	22.7	20	6.9	38.3
10	180.2	149	21.5	20	6.1	38
11	180.2	150	21.5	20	6.4	39
12	179.9	152.5	17.9	20	4.3	36.2

Cada espigón posee su propia longitud de trabajo, longitud de empotramiento, ancho y altura de diseño. La longitud de empotramiento, que se adapta a la forma del talud, se ha considerado un porcentaje de la longitud de trabajo y oscila entre el 8 al 11%. Mientras que para el ancho de los espigones se tiene las longitudes de 15 m y 20 m con el fin de evitar la esbeltez del espigón. Así mismo, la altura total del espigón (incluye la altura sumergida y una altura de profundidad de socavación de ~ 3 m) varía entre los 16.5 y 18.9 m. Finalmente los pilotes poseen una altura final que sobresale hasta 1 m por encima de la altura de diseño y se hincan al suelo hasta una longitud de 12 m (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.6. Características geométricas del Esquema de diseño para el ensayo N°3.

Espigón	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo Espigones	(α) Ángulo de Desviación Flujo	Espaciamiento o Espigones
1	28.7 m	90 °	1190.0 m			
				1-2	38 °	61.6 m
2	28.3 m	90 °	1190.0 m			
				2-3	10 °	193.3 m
3	27.8 m	90 °	1190.0 m			
				3-4	42 °	54.7 m
4	34.8 m	90 °	1190.0 m			
				4-5	21 °	116.5 m
5	51.5 m	90 °	1190.0 m			
				5-6	13 °	170.3 m
6	67.8 m	90 °	1190.0 m			
				6-7	22 °	112.7 m
7	53.8 m	90 °	1190.0 m			
				7-8	14 °	159.2 m
8	76.2 m	90 °	1190.0 m			
				8-9	10 °	192.3 m
9	86.8 m	90 °	1190.0 m			
				9-10	13 °	168.0 m
10	75.1 m	90 °	1190.0 m			
				10-11	19 °	124.7 m
11	55.7 m	90 °	1190.0 m			
				11-12	35 °	70.9 m
12	39.7 m	90 °	1190.0 m			

El esquema de diseño se construyó geoméricamente a partir del alineamiento natural del río. Se trazó un círculo que se circunscribe matemáticamente a la orilla actual (margen cóncava) con un radio de curvatura de 1190 m y a partir de este se trazó un arco paralelo que delimitó la nueva orilla virtual con un radio de curvatura de 1140 m (ver Anexo8). El número de espigones del esquema fue de 12 con un ángulo de inclinación de 90 grados al flujo. La longitud de trabajo de los espigones (medida desde la orilla natural hasta la orilla virtual) alcanzó longitudes de hasta el 26% del ancho del río. El espaciamiento entre espigones en este primer esquema es bastante variable, con longitudes de espaciamiento entre 1 y 7 veces la longitud de trabajo (ver Tabla 4.6).

4.3.1.2. Análisis de Resultados:

a) Cambios hidrodinámicos y morfológicos que producen las estructuras:

Para empezar el análisis, se presentan los vectores de velocidad media en su proyección horizontal sobre el cauce, indicándonos patrones de flujo. La descripción del comportamiento del flujo utilizando los patrones resulta ser complejo al no existir una marcada diferencia de magnitudes de velocidades en los tramos rectos del cauce y al iniciar su lado curvo. Por lo tanto, se utiliza el color rojo para marcar los vectores con mayor valor numérico y así diferenciarlos (ver Figura 4.5).

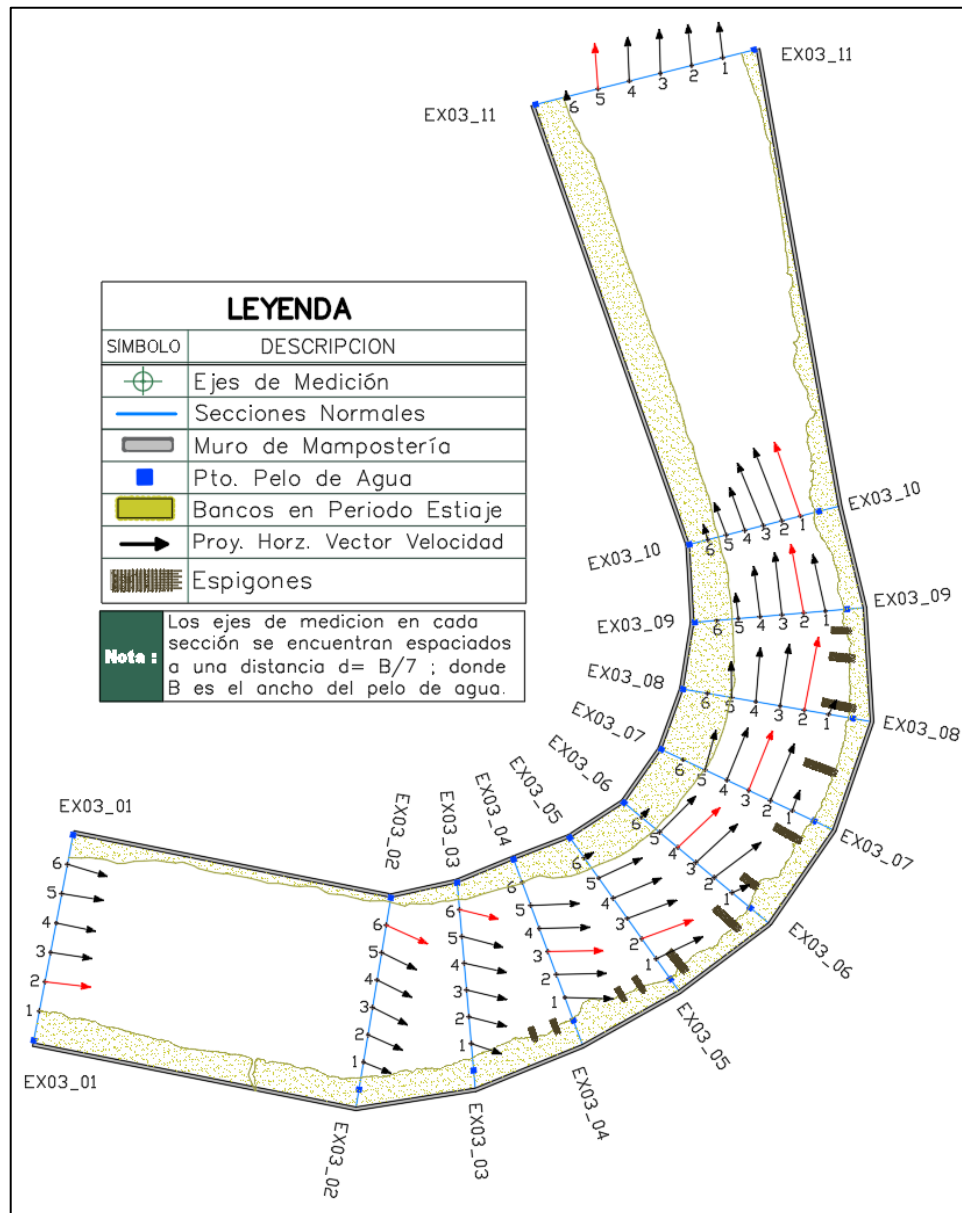


Figura 4.5. Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo N°3.

Los vectores de velocidades medias muestran un patrón diferente al mostrado en los ensayos sin estructuras. Se observa que los espigones colocados entre las secciones EX03_03 y EX03_09 influyen sobre la dirección de los vectores de velocidad a lo largo del cauce, pero con mayor relevancia en el tramo curvo. En efecto, las direcciones de los vectores de velocidad ingresan en forma paralela al tramo recto, hasta la sección EX03_02. Luego, hasta alcanzar la sección EX03_05, cambian su dirección hacia la margen derecha e ingresan directamente a la zona de campo de los 4 primeros espigones. Una vez en la sección EX03_05 y hasta la sección EX03_10, los vectores se direccionan adoptando la nueva orilla virtual. Finalmente, hacia la sección de salida EX03_11, el tramo es recto y los vectores tienen una ligera desviación hacia la margen derecha.

Así mismo podemos ver la posición de los mayores vectores de velocidad. El flujo ingresa en la sección EX03_1 con velocidades casi uniformes en el centro del cauce y alcanza la sección EX03_2 con velocidades ligeramente mayores del lado de la margen izquierda. Hacia la sección EX03_03 el flujo está ingresando hacia la zona curva con magnitudes mayores de velocidad en la zona izquierda y al centro del cauce. Luego entre las secciones EX03_04 a EX03_09 el flujo es acelerado hacia el centro del cauce y al límite de la punta de los espigones. Alcanzando la sección EX03_10 el flujo se acelera hacia la margen derecha; y al llegar a la sección EX03_11, las velocidades toman su mayor valor hacia el lado izquierdo y centro del cauce.

Tabla 4.7. Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el Ensayo N°3.

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX03_1	0.05	2.50	2.40	2.27	2.47	2.47
EX03_2	1.68	2.08	2.11	2.19	2.25	2.41
EX03_3	1.76	2.16	2.34	2.46	2.40	2.47
EX03_4	2.74	2.85	3.14	2.87	2.80	0.43
EX03_5	2.87	3.13	3.09	3.10	2.84	1.70
EX03_6	1.10	3.25	3.29	3.33	3.11	1.53
EX03_7	1.04	3.49	3.71	3.37	2.57	0.10
EX03_8	0.95	4.08	3.72	3.17	2.31	0.05
EX03_9	3.17	3.96	3.69	2.96	1.63	0.15
EX03_10	4.43	4.25	3.94	2.83	2.18	1.13
EX03_11	2.15	2.23	2.53	2.45	2.55	0.79

Siguiendo con el análisis, los valores de velocidad registrados en cada eje de medición constatan lo mostrado en los patrones de flujo (ver Tabla 4.7). En la tabla de velocidades medias los valores máximos mayores a 3.0 m/s se dan entre las secciones EX03_05 a EX03_10 en la proximidad de la punta de los espigones y hacia el centro del cauce (Eje 2 y 3). Contrariamente las velocidades mínimas con valores menores a 1.8 m/s; se dan específicamente entre las secciones EX03_1 a EX03_03 y EX03_06 a EX03_08 del lado de la margen derecha (Eje 1); y entre las secciones EX03_4 a EX03_11 del lado de la margen izquierda hacia la llanura de inundación (Eje 6). Coincidentemente el registro de velocidades del eje 1 se encuentra en la zona de campo de espigones entre las secciones EX03_06 a EX03_08.

Para comparar los cambios de velocidades que han producido los espigones con respecto al comportamiento natural del río sin estructuras, podemos contrastarlos con los datos obtenidos del ensayo N°2 (ver Tabla 4.2 y título 3.4.2). En la tabla de variaciones porcentuales podemos evaluar en que porcentaje se han reducido o aumentado las velocidades a lo largo del cauce (ver Tabla 4.8). En la proximidad de la zona de campo de espigones EX03_3 a EX03_9, podemos observar que solo a partir de la sección EX03_6 a EX03_9 hay una reducción porcentual de las velocidades del flujo. Esto se debe a que el registro de velocidades en el eje 1 está dentro de la zona de campo de espigones para los 7 últimos espigones. Contrariamente, hacia la punta de los espigones y al centro del cauce sucede una aceleración del flujo importante, típica de los espigones. Teniendo incrementos porcentuales de hasta 50.2 % entre las secciones EX03_5 a EX03_9; y hacia aguas abajo de la sección EX03_10 fuera del campo de espigones. Desde lo mencionado, los espigones 1 a 5 no influyen en

un incremento importante en la velocidad del flujo fuera de la zona de campo de espigones; mientras que los últimos lo hacen de forma dramáticamente. Esto nos indica que la longitud de trabajo de los espigones influye directamente sobre la aceleración del flujo a lo largo del cauce.

Tabla 4.8. Variaciones Porcentuales de Velocidades medias del Ensayo 2 respecto al Ensayo 3.

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX03_1	-97.4%	4.8%	-10.6%	-11.4%	-12.6%	3.7%
EX03_2	-1.0%	-9.9%	-1.2%	-10.3%	-9.1%	2.5%
EX03_3	-9.2%	4.8%	-0.8%	-8.9%	-6.7%	0.6%
EX03_4	9.2%	8.4%	15.7%	0.9%	-4.0%	-80.2%
EX03_5	14.9%	15.3%	8.9%	0.2%	-3.9%	-26.1%
EX03_6	-58.1%	17.5%	11.1%	17.2%	19.0%	375.6%
EX03_7	-66.9%	12.0%	21.5%	18.0%	32.5%	-53.6%
EX03_8	-69.9%	39.8%	32.6%	32.5%	13.3%	-83.6%
EX03_9	-2.6%	45.2%	41.6%	34.1%	-10.3%	462.3%
EX03_10	19.3%	43.4%	50.2%	9.1%	-0.3%	498.0%
EX03_11	8.5%	-9.3%	10.4%	-2.0%	15.1%	24.9%

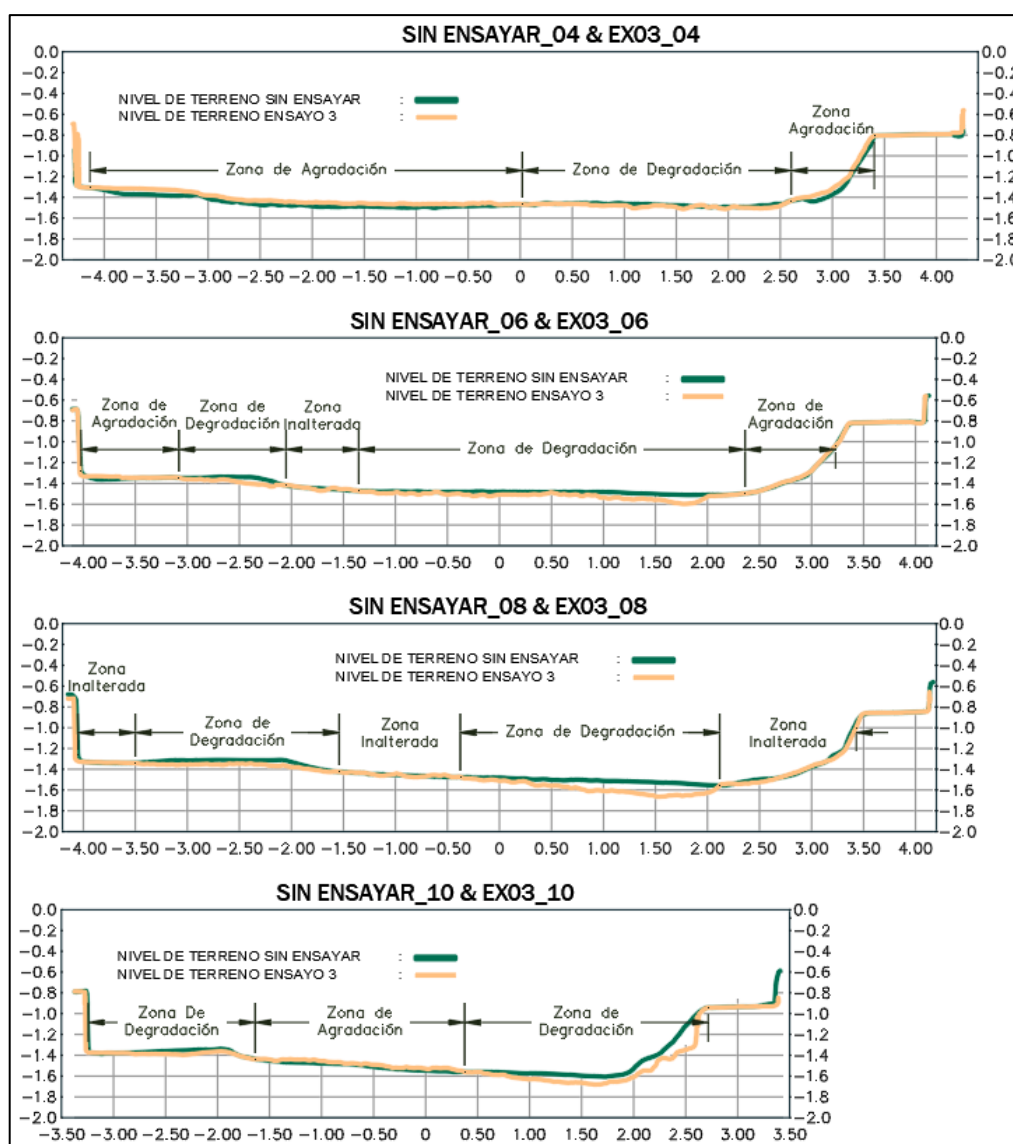


Figura 4.6. Comparación cualitativa de la Batimetría N°3 y Batimetría Sin Ensayar.

Del lado de la margen izquierda, entre la sección EX03_4 a EX03_08, existen incrementos y reducciones porcentuales importantes del flujo con valores de signos aleatorios; que poseen origen de valores numéricos bajos. Las velocidades poseen estos valores debido a que la batimetría del río es compleja, los tirantes son bajos y la turbulencia es alta. Del mismo modo sucedió en la sección de ingreso en el Eje de medición 1 en donde se redujo la velocidad en un 97.4%. No obstante, en la sección EX03_9 a EX03_10 en el eje 6, el aumento porcentual tiene su origen en el flujo que inunda la llanura de inundación y es acelerado debido a la presencia de un estrangulamiento del cauce.

Finalmente lo visto en la tabla de incrementos porcentuales y los patrones de flujo, pueden verificarse con las batimetrías superpuestas entre sí (ver Figura 4.6 y Anexo11). El análisis consiste en determinar zonas de agradación y degradación al comparar la Batimetría Sin Ensayar con la Batimetría del Ensayo N°3. A la primera se le asignó el color verde y a la segunda el color crema.

Entre las secciones EX03_1 a EX03_3 el cauce se sedimenta y entre las secciones EX03_3 a EX03_5 el centro del cauce se erosiona. A partir de la sección EX03_6 hasta la sección EX03_9, el cauce se erosiona fuera de la zona de trabajo de los espigones. Luego desde la sección EX03_9 a EX03_10, el cauce empieza a ser recto y las erosiones se presentan sobre sus márgenes derecha e izquierda. En el tramo EX03_10 a EX03_11 el cauce se sedimenta en toda su extensión. Lo mencionado se relaciona con la disminución e incrementos de velocidades a lo largo del cauce. Es decir, donde se redujo la velocidad se presentó agradación y en donde no degradación. Así mismo, podemos inferir que los espigones cumplen con su objetivo de alejar la erosión que se genera al pie del talud; pero a su vez generan cambios morfológicos importantes en el cauce del río debido a la constricción del flujo que producen.

b) Velocidades, tirantes y cambios morfológicos que se presentan alrededor de las estructuras

En un inicio se analizan los cambios morfológicos que se producen bajo cada espigón. Para lo cual, se utilizan secciones topográficas que atraviesan el centro de los espigones y muestran los niveles de terreno para la batimetría Sin Ensayar con la de este Ensayo (ver Figura 4.7 y para más detalles Anexo15).

En las secciones topográficas de cada espigón, la erosión lateral en el talud sumergido es nula; y en cambio, se presenta una ligera sedimentación. Esto indica que los espigones al reducir la velocidad en la zona de campo de espigones, reducen los procesos erosivos en el talud. De este modo la longitud de empotramiento de los espigones no ha sido sobrepasada y por lo tanto es la adecuada (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.9. Variación de niveles registrados en la punta de los espigones, extensión de la socavación y velocidad media; para el Ensayo N°3.

ESPIGÓN	Δ NIVELES	V _{MEDIA}	COMENTARIO
1	1.0 m	2.31 m/s	Sedimentación
2	2.0 m	2.56 m/s	Sedimentación
3	1.2 m	2.50 m/s	Socavación
4	0.8 m	2.95 m/s	Sedimentación
5	1.6 m	3.00 m/s	Sedimentación
6	2.7 m	3.36 m/s	Socavación
7	4.4 m	3.45 m/s	Socavación
8	3.5 m	3.43 m/s	Socavación
9	5.6 m	3.87 m/s	Socavación
10	7.8 m	3.49 m/s	Socavación
11	4.0 m	2.86 m/s	Socavación
12	2.8 m	2.46 m/s	Socavación

Desde otro enfoque podemos observar si se presenta o no socavación en la punta del espigón. Las secciones indican que los procesos erosivos han ocasionado una seria socavación al pie de los 7 últimos espigones. Esta socavación no se presenta solo de forma vertical, sino que avanza decrecientemente hacia la margen derecha invadiendo la longitud de trabajo.

Para constatar lo observado, se midió de forma vertical al pie de la punta de los espigones la diferencia de niveles entre la batimetría sin ensayar y la de este ensayo. De modo que se obtuvieran valores de niveles de sedimentación o socavación (ver Tabla 4.9).

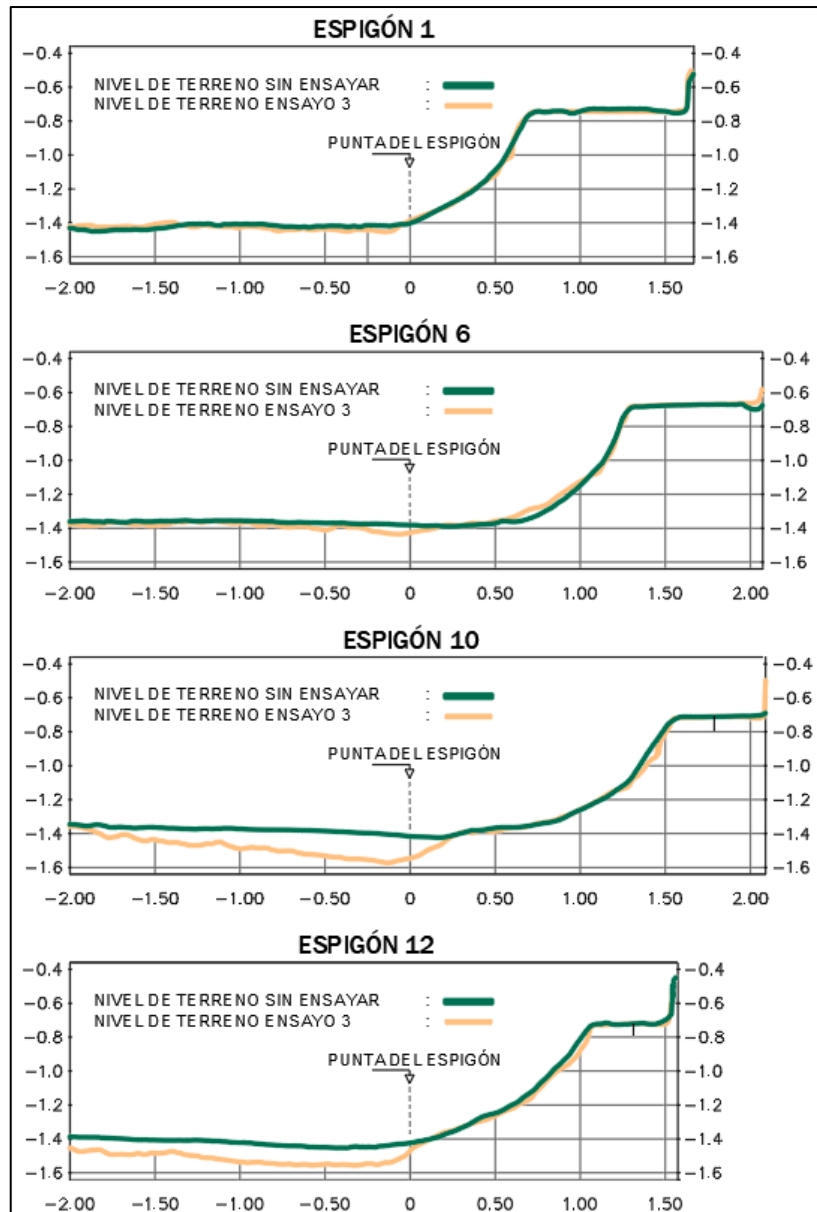


Figura 4.7. Secciones de Espigones del Esquema de Diseño 1. Comparación de la Batimetría N°3 y Batimetría Sin Ensayar.

Los valores de la Tabla 4.9 indican que solo cuatro espigones (1,2,4 y 5) no presentan socavación mientras que los ocho restantes sí. Los valores de socavación resultan relevantes en los espigones 7 a 11 donde su altura alcanza los 7.8m, que es un valor muy superior a los 3 m de entramado de troncos enterrado en el lecho.

Si nosotros comparamos estos datos con los de la longitud de trabajo de la Tabla 4.5, en la mayoría de espigones; donde la longitud de trabajo fue mayor, mayor fue la socavación en la punta del espigón.

En la misma tabla también se muestran las velocidades registradas en la punta del espigón la cuales se relacionan con el grado de socavación que se presenta. En este caso los valores de velocidad fueron registrados durante el ensayo a una longitud de 15 a 35 cm desde su punta. Estos valores nos indican cuán acelerado es el flujo en esta zona debido a la constricción del flujo.

Los valores de velocidad en la Tabla 4.10 nos indican que el flujo en la punta del espigón es mucho más veloz que el presentado en la zona de campo de espigones, pero es más retardado que el flujo en el centro del cauce (ver Tabla 4.2). Estos valores se mantienen en el rango de 2.31 m/s a 3.87 m/s, siendo su máximo registrado en el espigón 9 y su mínimo en el espigón 1. Así mismo, si observamos los valores de velocidad y los valores de socavación, se hace difícil encontrar una relación directa entre la velocidad media y la variación de niveles. Esto se debe a que la hidrodinámica del cauce y los procesos de transporte de sedimentos, son complejos.

Tabla 4.10. Tirantes registrados en los espigones del Ensayo 3.

# Espigón	Elevación Espigón (m.s.n.m)	Elevación Tirante (m.s.n.m)
1	180.3	182.3
2	180.9	182.1
3	180.9	182.2
4	181.8	182
5	180.9	181.9
6	180.8	181.5
7	180.8	181.1
8	180.2	181.3
9	180.2	181.4
10	180.2	181.6
11	180.2	181.1
12	179.9	180.9

Finalmente podemos observar si el nivel de diseño para las estructuras fue el adecuado. Se registraron los niveles de agua y se compararon con los niveles de diseño de los espigones (ver Tabla 4.11). La elevación de tirante indica que los espigones fueron sobrepasados cumpliéndose el estado de sumergencia para el periodo de diseño asignado. La diferencia de niveles no sobrepasa los 2 m y permite el ingreso directo de flujo lateral. Sin embargo, no es un flujo importante que afecta la estabilidad del talud y la retención de sedimentos. En sí, la condición de espigones permeables hace que en toda su altura se permita este tipo de flujo. No obstante, la sumergencia no influye determinadamente, la variación de la permeabilidad si lo hace, en el sentido que una menor permeabilidad hacia el lado del talud implicó menor erosión lateral sobre este.

4.3.1.3. Discusión de La alternativa de diseño N°1

Los resultados nos indican que los espigones influyen determinante sobre la hidrodinámica y morfología del río. Los 12 espigones logran reducir las velocidades del flujo dentro del campo de los espigones, favoreciendo la sedimentación; y redireccionan el flujo fuera de esta zona, alejando la erosión de la margen derecha. Evidenciándose mediante la reducción porcentual de hasta 70 % en la zona de campo de espigones; y en los taludes que presentan una ligera sedimentación o permanecen inalterados.

Sin embargo, lo contraproducente del esquema de diseño fue el incremento alto de velocidades debido a la constricción del flujo. Esto sucedió aguas abajo del espigón 5 y fuera de la zona protegida con espigones. En esta zona se registraron; incrementos porcentuales de velocidad de hasta el 50 % y alta turbulencia en la punta del espigón con velocidades altas de hasta 3.87 m/s. Esto a su vez

generó la degradación general del cauce y una alta socavación en la punta de los 7 últimos espigones con valores de hasta 7.8m.

La constricción del flujo tuvo su origen en la reducción de la sección hidráulica del río ocasionado por la presencia de los espigones. Cuando mayor fue la longitud de trabajo de los espigones se produjo una mayor constricción; y por lo tanto, una mayor degradación del cauce. La longitud de trabajo de los espigones varió entre 27.8 m y 86.8 m (6.6 % y 20.5 % del ancho medio del río); pero son los últimos 7, que poseen mayor longitud, los que registraron mayores socavaciones. Una gran socavación representa un riesgo para la estabilidad de la estructura porque produce la falla de los pilotes. Los mismos que son encargados de aportar resistencia a la flotación y traslación. Contrariamente, los 4 primeros espigones no inciden determinadamente sobre la aceleración del flujo y tampoco sufren de una socavación local importante por su corta longitud de trabajo.

Al observar los patrones de flujo y secciones topográficas podemos verificar que la extensión de trabajo de los espigones debe ajustarse. En el inicio de protección de espigones, la erosión no es un problema hasta la sección EX03_4 (posición del espigón 2) debido a que las mayores velocidades del flujo se presentan del lado de la margen izquierda. Análogamente, hacia aguas abajo del último espigón, existe una gran extensión de margen derecha que se ha erosionado como consecuencia de la aceleración del flujo que producen los espigones. Por lo tanto, puede extenderse la protección hacia aguas abajo del último espigón y aproximarse hacia la sección EX03_10; y puede prescindirse de unos metros aguas arriba para que la posición del primer espigón se acerque a la sección EX03_4.

Desde lo mencionado, el esquema de diseño de espigones debe mejorar. El trazo geométrico del diseño comienza con la delimitación del alineamiento del río y la construcción de la orilla virtual paralela a esta. En nuestro caso el alineamiento del río y la orilla virtual solo poseían 1 radio de curvatura; por lo que se crearon longitudes muy desiguales sobre el cauce. Esto se puede apreciar en las longitudes de trabajo iniciales pequeñas poco productivas, y en longitudes largas de los últimos espigones contraproducentes.

El esquema de diseño también empleó la teoría de ángulo de desviación de flujo y orientación de los espigones para distribuir los espigones sobre el cauce. Esta distribución debe ajustarse con el fin de permitir una separación de espigones más uniformes y más eficientes a las actuales. Del mismo modo, la orientación de los espigones de forma perpendicular se ha comportado de forma conveniente. Pero si se piensa en aumentar la longitud del primero y último debería considerarse darles una orientación hacia aguas abajo con la finalidad de disminuir la erosión en su punta.

Así mismo la condición de sumergencia para este esquema de diseño se cumplió. El nivel de diseño de los espigones fue sobrepasado por el nivel de tirante del río hasta en una altura de 2m. Esto permitió el ingreso directo de un flujo lateral por encima del espigón que no pone en riesgo la estabilidad del talud en la zona de empotramiento del espigón y la retención de sedimentos en la zona de campo de espigones. Su influencia resulta ser mínima, porque los espigones son permeables y permiten en toda su altura el ingreso de este tipo de flujo; y porque la concentración de sedimentos en la zona cercana a la superficie es baja. No obstante, para evitar alguna excedencia de flujo durante el periodo de máximas avenidas puede considerarse la condición de no sumergido para una próxima alternativa.

Para finalizar el análisis, las otras características individuales de cada espigón han funcionado correctamente. Estas características son el ancho del espigón, la longitud de empotramiento, la altura del entramado embebido en el lecho y la permeabilidad.

El ancho del espigón fue condicionado a su longitud para disminuir su esbeltez y fomentar la proliferación de vida acuática. Se ha observado que el flujo que atraviesa el espigón pierde energía a lo largo de esta longitud, debido a la arquitectura compleja de entramados. Si se piensa disminuir las longitudes en una nueva alternativa, mantener el ancho generaría una mayor estabilidad de la estructura.

Otras características son la longitud de anclaje del espigón y la altura del entramado empotrado en el lecho. Se ha verificado en las secciones topográficas, que la longitud de anclaje es mayor a los

cambios morfológicos que suceden en esta zona; y por lo tanto es la adecuada. Del mismo modo se verificó que la altura del entramado empotrado en el lecho (~3m) no cubre la socavación en la punta de los espigones 7 a 11 (3.5 m a 7.8 m). Sin embargo, mantener su altura es lo adecuado debido a que; la socavación decrece hacia el talud, solo unos cuantos espigones lo sufren y el aporte a estabilidad que brinda esta altura es muy poca.

Por último, la permeabilidad del alrededor del 35%, de los espigones ha cumplido eficientemente al retardar el flujo en la zona de campo de espigones, favoreciendo la captura de sedimentos. Así mismo cumple con la función de hacer una transición gradual de velocidades desde el talud hacia la punta de los espigones.

4.3.2. Ensayo N°4 ($Q_p = 12997 \text{ m}^3/\text{s}$)

4.3.2.1. Características de la alternativa de Diseño N°2:

Esta segunda alternativa de diseño se caracterizó por poseer espigones de la clase no sumergidos con un borde libre de aproximadamente 2m. El nivel de diseño superó el nivel de tirante para un periodo de retorno de 50 años, con el fin de cubrir excedencias de flujo durante las máximas avenidas. Así mismo, la alternativa se caracterizó, por disponer de espigones formados con entramados de troncos con permeabilidades que oscilan entre el 33% y 38%.

Cada espigón posee su propia longitud de trabajo, longitud de empotramiento, ancho y altura de diseño. La longitud de empotramiento tuvo valores entre el 6 al 11% de la longitud de trabajo de los espigones. Mientras que el ancho del espigón es de 20 m con el fin de evitar su esbeltez. Así mismo, la altura total del espigón varía entre los 23.1 y 27.9 m. Esta altura la conforman una altura sumergida, un borde libre de ~2 m y una altura empotrada en lecho de ~ 3 m. Finalmente los pilotes poseen una altura final que sobresale hasta 1 m por encima de la altura de diseño y se hincan al suelo hasta una longitud de ~ 15 m (ver Tabla 4.11).

Tabla 4.11. Características geométricas de los 12 espigones del segundo esquema de diseño.

# Espigón	Elevación (m.s.n.m)	Prof. Pilote (m.s.n.m)	Altura (m) Entramado	Ancho (m)	Empotramiento Longitud (m)	Permeabilidad (%)
1	184.2	148.8	23.1	20.0	5.0	35.5
2	184.2	150.0	23.1	20.0	5.8	33.5
3	184.2	148.8	24.3	20.0	4.7	36.8
4	184.0	148.6	24.3	20.0	5.2	36.3
5	184.0	148.4	25.5	20.0	4.1	33.0
6	184.0	144.8	27.9	20.0	5.9	38.0
7	183.8	146.3	26.7	20.0	4.8	35.9
8	183.8	146.2	26.7	20.0	5.1	36.3
9	183.8	146.2	25.5	20.0	4.9	35.8
10	183.6	147.4	24.3	20.0	3.7	33.5
11	183.6	148.6	24.3	20.0	5.1	36.8

El esquema de diseño se construyó inicialmente a partir del trazo geométrico del alineamiento del río y la determinación de la nueva orilla virtual. El alineamiento se construyó utilizando 2 círculos circunscritos matemáticamente a la orilla natural (margen cóncava) con radios de curvatura de 1490.5 m y 906.0 m. A partir de este se trazaron dos arcos paralelos, con radios de curvatura de 1445.5 m y 850.0 m, que delimitaron la nueva orilla virtual (ver Anexo9). Adicionalmente, se decidió modificar la extensión de trabajo de espigones; a 80 m y 160 m aguas abajo del inicio y final de la protección de la primera alternativa de diseño.

El número de espigones del esquema fue 11, espaciados a lo largo del cauce utilizando la teoría de ángulo de desviación de flujo y orientación del espigón. La orientación de los espigones con respecto al flujo fue; de 120 grados para el primer y último espigón, y 90 grados para el resto de espigones. La elección de optar por una inclinación hacia aguas debajo de 120° fue para minimizar la socavación en la punta de estos espigones. Así mismo, los ángulos de desviación de flujo fueron de 14° y 15° con el fin de crear una separación uniforme en el cauce. Con ambos se obtuvieron espaciamientos entre espigones de 2 a 3 veces la longitud de trabajo (ver Tabla 4.6).

Tabla 4.12. Características geométricas del Esquema de diseño para el ensayo N°4.

Espigón	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo entre Espigones	Ángulo de Desviación Flujo (α)	Espaciamiento entre Espigones
1	51.6 m	120 °	1490.5 m			
				1-2	14 °	175.1 m
2	48.0 m	90 °	1490.5 m			
				2-3	15 °	144.0 m
3	70.1 m	90 °	1490.5 m			
				3-4	15 °	144.0 m
4	67.2 m	90 °	1490.5 m			
				4-5	15 °	144.0 m
5	41.9 m	90 °	906.0 m			
				5-6	15 °	143.3 m
6	52.8 m	90 °	906.0 m			
				6-7	15 °	155.1 m
7	62.6 m	90 °	906.0 m			
				7-8	15 °	155.1 m
8	64.5 m	90 °	906.0 m			
				8-9	15 °	155.1 m
9	58.2 m	90 °	906.0 m			
				9-10	15 °	155.1 m
10	45.6 m	90 °	906.0 m			
				10-11	15 °	155.1 m
11	63.6 m	120 °	906.0 m			

4.3.2.2. Análisis de Resultados:

a) Cambios hidrodinámicos y morfológicos que producen las estructuras:

En un inicio, los vectores de velocidad media en su proyección horizontal son representados a lo largo del cauce para indicarnos los patrones del flujo (ver Figura 4.8). En esta representación los vectores con mayor valor numérico han sido colocados de color rojo, para mostrarnos de qué lado del cauce se presentan las mayores velocidades.

Los vectores de velocidades medias muestran un patrón difícil de analizar y diferente al mostrado en el Ensayo N°3. Se observa que los 11 espigones colocados entre las secciones EX04_03 y EX04_10 cambian la dirección de los vectores de velocidad a lo largo del cauce, pero con mayor relevancia en el tramo curvo.

En efecto; a lo largo del tramo recto del río, entre la sección EX04_01 y EX04_02, los vectores ingresan con una ligera orientación hacia la margen derecha. Esta orientación se mantiene en el inicio del tramo curvo, entre EX04_02 y EX04_04. Hacia aguas abajo, entre la sección EX04_04 a EX04_07, su orientación cambia para adoptar el alineamiento de la orilla virtual. Luego, al dejar atrás la sección EX04_07 y hasta la sección EX04_11, los vectores vuelven a cambiar su dirección hacia la margen derecha. Desde otra perspectiva, al analizar la ubicación de los espigones entre las

secciones mencionadas, vemos que el flujo ha ido reorientándose gradualmente a partir de la posición del espigón 1; pero cuando alcanza la posición del espigón 8 el flujo se dirige hacia la zona de espigones. Esto implicaría una zona de alta turbulencia entre, aguas abajo del mencionado espigón y hasta la sección EX04_10.

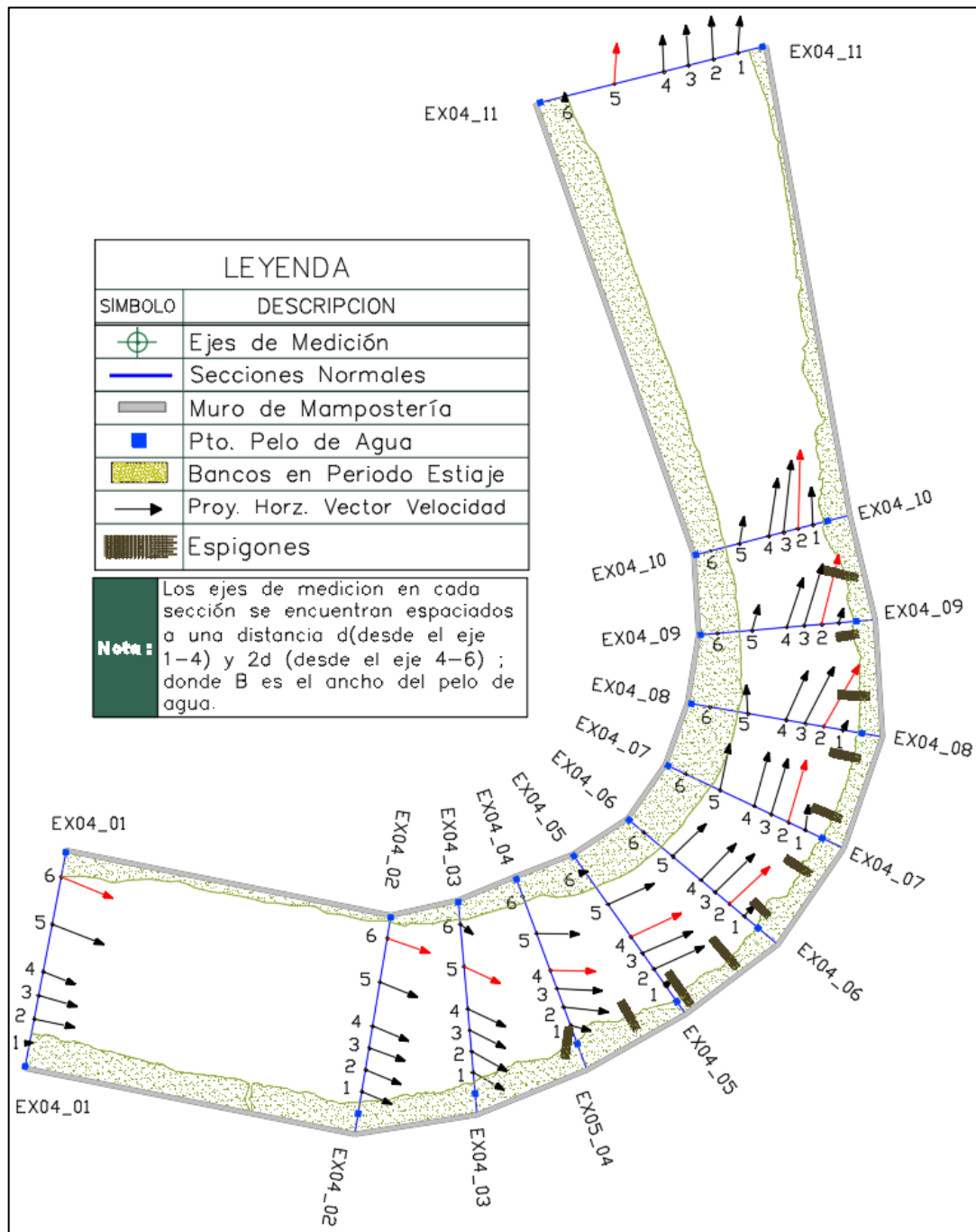


Figura 4.8. Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo N°4.

Así mismo podemos ver la posición de los mayores vectores de velocidad. El flujo ingresa en la sección EX04_1 y alcanza la sección EX04_2 con velocidades ligeramente mayores del lado de la margen izquierda. Hacia la sección EX04_03 el flujo está ingresando hacia la zona curva con magnitudes mayores de velocidad en la zona izquierda y al centro del cauce. Llegando a la sección EX04_04 y hasta EX04_10 el flujo ya es acelerado hacia el centro del cauce y al límite de la punta de los espigones. Ya a la salida del cauce, en la sección EX04_11, las velocidades toman su mayor valor hacia el lado izquierdo y centro del cauce.

Siguiendo con el análisis; los valores numéricos de los vectores que señalaban los patrones de flujo, son mostrados en una tabla (ver Tabla 4.13). En dicha tabla se puede apreciar más claramente su diferenciación; y se puede constatar la localización de los mayores vectores de velocidad del flujo (anteriormente señaladas de color rojo).

Si observamos los valores, existe una disminución de velocidades en la zona de campo de espigones, entre la sección EX04_04 y hasta EX04_09, con valores entre 0.57 m/s y 1.57 m/s. Pero también existe una clara aceleración del flujo en la punta de los espigones (eje 2), con valores que ascienden gradualmente desde 2.56 m/s (Espigón 1) hasta 3.82 m/s (Espigón 11). Otra cosa importante de señalar, es que aguas abajo del último espigón el flujo toma su máximo valor de 4.13 m/s en todo el cauce.

Tabla 4.13. Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el Ensayo N°4.

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX04_1	0.30	2.28	2.22	1.94	3.00	3.05
EX04_2	1.77	2.10	2.07	2.08	2.25	2.41
EX04_3	1.92	2.25	2.18	2.28	2.31	1.54
EX04_4	1.21	2.56	2.58	2.67	2.52	0.39
EX04_5	0.57	3.02	3.01	3.08	2.82	0.41
EX04_6	1.13	3.12	3.09	2.94	2.66	0.35
EX04_7	1.57	3.52	3.19	3.23	2.68	0.08
EX04_8	0.69	3.77	3.46	3.09	2.13	0.03
EX04_9	0.89	3.82	3.54	2.93	1.48	0.01
EX04_10	2.11	4.13	3.88	3.21	1.62	0.05
EX04_11	2.12	2.28	2.27	2.06	2.30	0.48

Desde otro punto de vista, podemos relacionar porcentualmente las velocidades obtenidas del ensayo 2 (ver Tabla 4.2 y título 5.2) con respecto a las obtenidas de este ensayo. De esta forma podemos hablar de un incremento o reducción de las velocidades a lo largo del cauce por la presencia de espigones (ver Tabla 4.14).

Tabla 4.14. Variaciones Porcentuales de Velocidades medias del Ensayo N°2 respecto al Ensayo N°4.

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX04_1	-85.6%	-4.4%	-17.4%	-24.5%	6.3%	27.8%
EX04_2	4.5%	-8.8%	-3.1%	-14.9%	-9.2%	2.6%
EX04_3	-1.1%	8.9%	-7.6%	-15.7%	-10.5%	-37.2%
EX04_4	-51.9%	-2.5%	-4.9%	-6.2%	-13.4%	-82.1%
EX04_5	-77.3%	11.6%	5.9%	-0.4%	-4.6%	-82.3%
EX04_6	-57.0%	13.0%	4.5%	3.5%	1.7%	9.6%
EX04_7	-50.1%	13.0%	4.3%	13.0%	38.5%	-62.7%
EX04_8	-78.1%	29.2%	23.4%	29.1%	4.6%	-87.8%
EX04_9	-72.7%	40.3%	35.6%	32.6%	-18.8%	-45.9%
EX04_10	-43.3%	39.4%	47.8%	23.7%	-25.8%	-71.6%
EX04_11	6.7%	-7.4%	-1.2%	-17.5%	3.8%	-24.5%

Del lado de la margen derecha del río (eje1) y entre las secciones EX04_4 a EX04_10 (donde se encuentra la zona de campo de espigones); podemos observar una reducción porcentual de las velocidades del flujo con porcentajes entre 43.3% y 77.3%. Contrariamente, hacia la punta de los

espigones (eje 2) sucede una aceleración del flujo importante; con incrementos porcentuales de hasta 40.3 % entre las secciones EX04_4 a EX04_10. Del mismo modo todo el flujo en el centro del cauce, fuera de la zona protegida y hasta la sección EX04_10; sufre de un incremento de velocidades debido a la reducción de la sección hidráulica. Esto se puede apreciar de forma más clara entre las secciones EX04_8 a EX04_10; donde se alcanza un incremento porcentual alto de hasta 47.8% que es el máximo registrado.

Cabe mencionar que, del lado de la margen izquierda y entre la sección EX04_1 a EX04_11, existen incrementos y reducciones porcentuales importantes del flujo. Estos porcentajes poseen valores de signos aleatorio, pero también tienen origen en valores numéricos bajos. Las velocidades poseen estos valores debido a que la batimetría del río es compleja, los tirantes son bajos y la turbulencia es alta. Lo mismo sucedió en la sección de ingreso, en el Eje de medición 1, en donde se redujo la velocidad en un 85.6%.

Desde lo mencionado, los 11 espigones se comportan de forma eficiente al reducir las velocidades en la zona de protección; pero contrariamente lo aceleran en la punta de espigones y hacia el centro del cauce. Así mismo, los mayores incrementos se produjeron entre la posición de los espigones 8 a 11 indicando que en esta zona se estaría produciendo una mayor turbulencia.

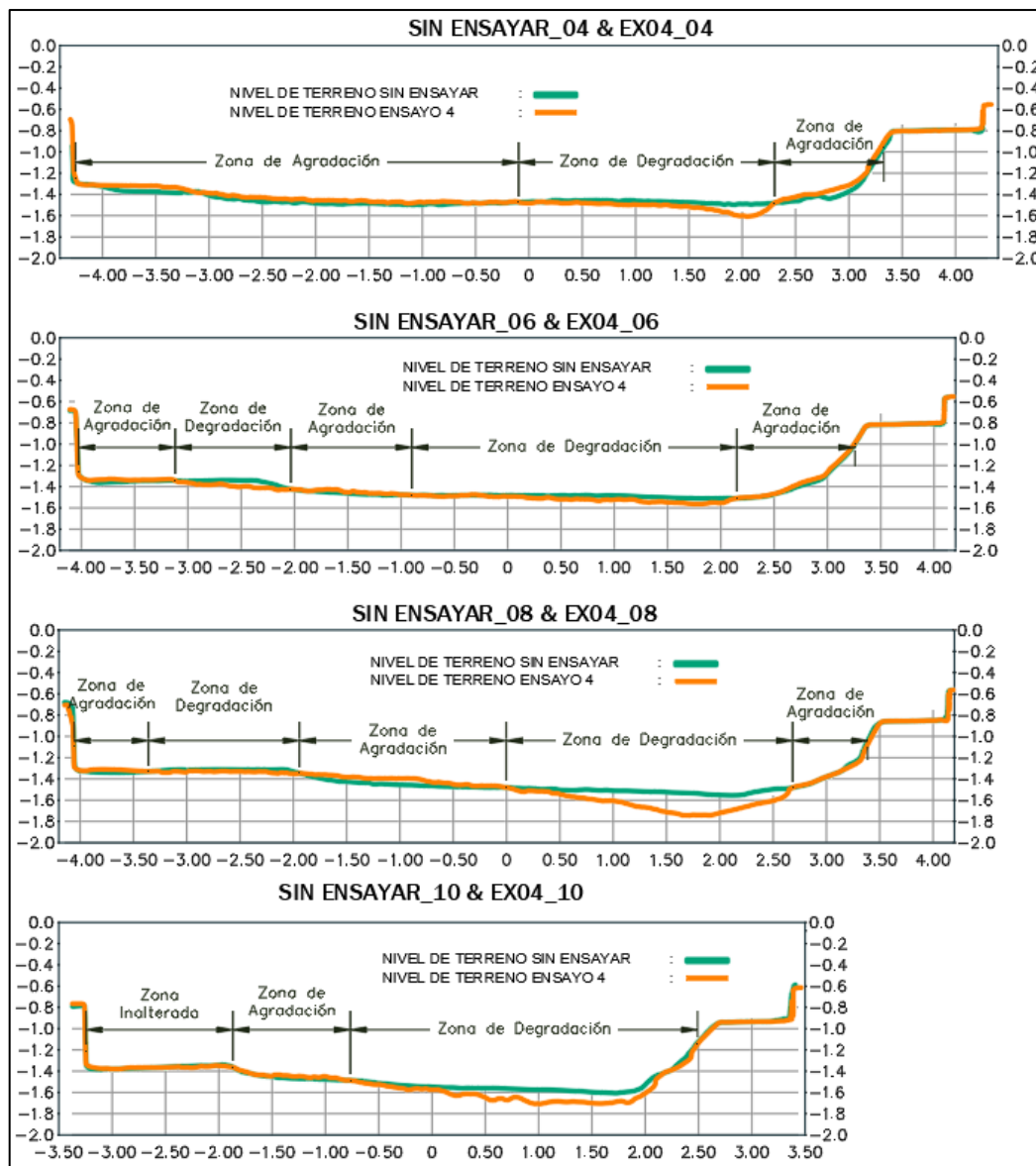


Figura 4.9. Comparación cualitativa de la Batimetría N°4 y Batimetría Sin Ensayar.

Para finalizar, en secciones topográficas se presentan los niveles de terreno de la Batimetría del Ensayo N°4 y la Batimetría Sin Ensayar (ver Figura 4.9 y más detalles en Anexo12). Con el fin de que se pueda observar los cambios morfológicos que ocurren a lo largo del cauce (agradación o degradación). Convenientemente para su diferenciación, a la primera se le asignó el color naranja y a la segunda el color verde.

Si observamos las secciones, en un inicio todo el cauce se sedimenta entre las secciones EX04_1 a EX04_3. Cuando alcanzan la sección EX04_4 y hasta la sección EX04_9, el cauce sufre un cambio morfológico repetitivo; hacia la margen izquierda se sedimenta, en el centro se erosiona y hacia el lado del talud se sedimenta (zona de protección). Así mismo, entre esas mismas secciones, la llanura de inundación aparece inalterable o sufre de agradación. Hacia aguas abajo, en la sección EX04_10, los procesos cambian, hacia la margen izquierda se sedimenta y hacia la margen derecha o taludes se erosiona. Cuando alcanza la última sección el cauce vuelve a sedimentarse en todo su ancho.

Lo mencionado se relaciona con la disminución e incrementos de velocidades a lo largo del cauce. Es decir, donde se redujo la velocidad se presentó agradación y en donde no degradación. Así mismo, podemos inferir que los espigones cumplen con su objetivo de alejar la erosión que se genera al pie del talud; pero a su vez generan cambios morfológicos importantes en el cauce del río debido a la constricción del flujo que producen. Otra cosa importante de mencionar es que existe una gran profundización del cauce en zona central a partir de la sección EX04_08 e inmediatamente hacia aguas abajo de la sección EX04_10; que ha sido alejada mientras existía protección de espigones. Del mismo modo se puede apreciar que en la sección EX04_10 el avance de erosión lateral hacia el talud resulta menor que en el ensayo anterior.

b) Velocidades, tirantes y cambios morfológicos que se presentan alrededor de las estructuras

En un inicio se analizan los cambios morfológicos que se producen bajo cada espigón. Para lo cual, se utilizan secciones topográficas que atraviesan el centro de los espigones y muestran los niveles de terreno para la batimetría Sin Ensayar con la de este Ensayo (ver Figura 4.10 y más detalles en Anexo16).

En las secciones topográficas de cada espigón, los cambios morfológicos que se presentan en los taludes corresponden primordialmente a los de sedimentación y solo unos pocos a la erosión; estos últimos con valores menores a 1 m. Esto indica que los espigones al reducir la velocidad en la zona de campo de espigones, reducen los procesos erosivos en el talud. De este modo la longitud de empotramiento de los espigones no ha sido sobrepasada y por lo tanto es la adecuada (ver Tabla 4.11).

Desde otro enfoque podemos observar si se presenta o no socavación en la punta del espigón. Las secciones indican que los procesos erosivos han ocasionado una seria socavación al pie de los 5 últimos espigones. Esta socavación no se presenta solo de forma vertical, sino que avanza decrecientemente hacia la margen derecha invadiendo la longitud de trabajo.

Para constatar lo observado, se midió de forma vertical al pie de la punta de los espigones la diferencia de niveles entre la batimetría sin ensayar y la de este ensayo. De modo que se obtuvieran valores de niveles de sedimentación o socavación (ver Tabla 4.15).

Los valores de la Tabla 4.15 indican que solo cuatro espigones (1,2,5 y 6) no presentan socavación mientras que los siete restantes sí. Los valores de socavación resultan relevantes en los espigones 7 a 11 donde su altura alcanza los 11.8 m, que es un valor muy superior a los 3 m de entramado de troncos enterrado en el lecho. Adicionalmente, si nosotros comparamos estos datos con los de la longitud de trabajo de la Tabla 4.11, verificamos que no se cumple la relación directa entre longitud de trabajo y socavación en la punta del espigón.

Del mismo modo, existe una gran diferencia entre la socavación de los primeros 6 espigones con respecto a los 5 últimos. Esto podría tener su origen en la alta turbulencia que se genera en la punta de los espigones. Si observamos los patrones de flujo entre las secciones EX04_07 a EX04_10 (ver

Figura 4.8), vemos que los vectores no fueron redireccionados correctamente y se dirigen hacia la margen derecha. De esta forma la turbulencia se genera más cercana a los pies de los espigones.

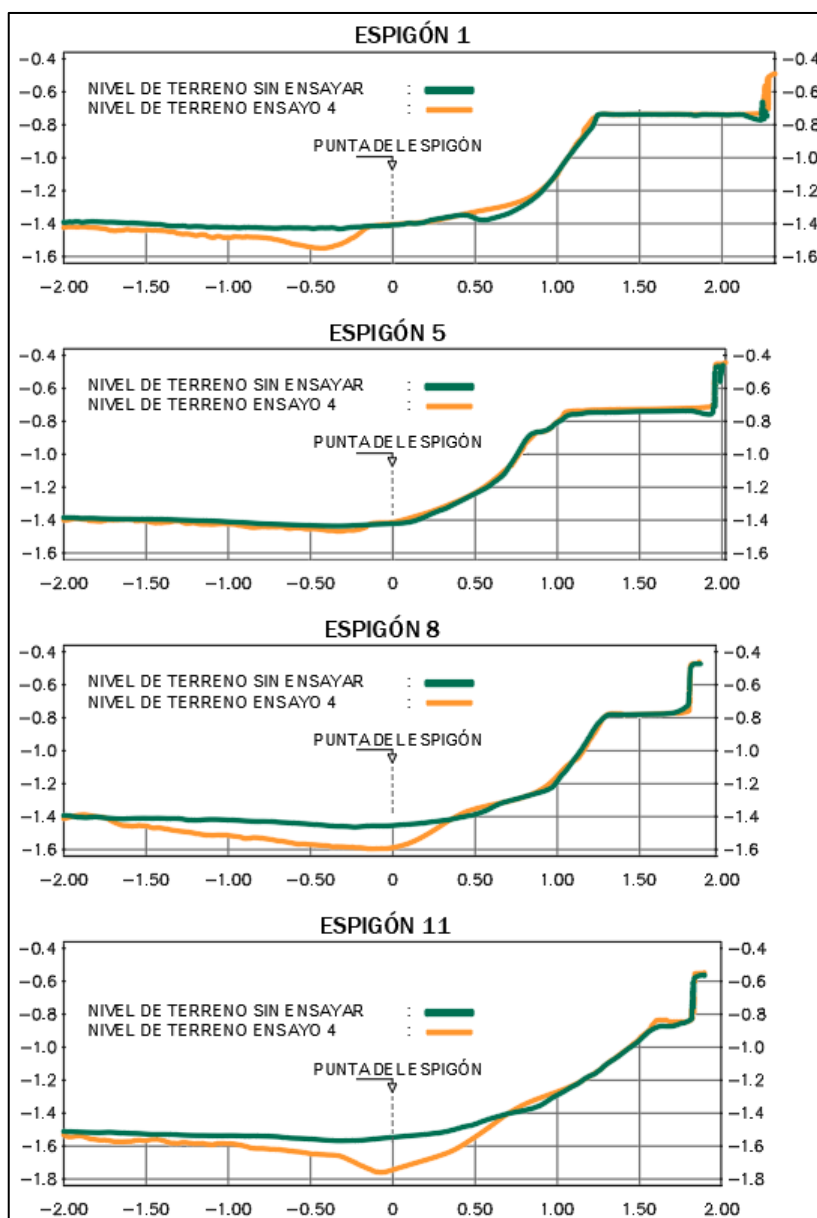


Figura 4.10. Secciones de Espigones del Esquema de Diseño 2. Comparación de la Batimetría N°4 y Batimetría Sin Ensayar.

En la misma tabla también se muestran las velocidades registradas en la punta del espigón la cuales se relacionan con el grado de socavación que se presenta. En este caso los valores de velocidad fueron registrados durante el ensayo a una longitud de 5 a 18 cm desde su punta. Estos valores nos indican cuán acelerado es el flujo en esta zona debido a la constricción del flujo.

Los valores de velocidad en la Tabla 4.15 nos indican que el flujo en la punta del espigón es mucho más veloz que el presentado en la zona de campo de espigones (ver eje 1 en la Tabla 4.13). Estos valores se mantienen en el rango de 2.27 m/s a 3.56 m/s, siendo su máximo registrado en el espigón 11 y su mínimo en el espigón 2. También observamos, que a excepción del espigón 6, existe una relación directa entre velocidad media y la variación de niveles; en el sentido que donde hay mayor velocidad se presenta mayor socavación. Sin embargo, esta relación no se da completamente porque la hidrodinámica del cauce y los procesos de transporte de sedimentos, son complejos.

Tabla 4.15. Velocidades medias y variación de niveles registrados en la punta de los espigones, para el Ensayo N°4.

Espigón	V _{MEDIA}	Δ Niveles	Comentario
1	2.59	0.2 m	Sedimentación
2	2.27	0.4 m	Sedimentación
3	2.59	1.0 m	Socavación
4	2.67	1.8 m	Socavación
5	2.45	0.5 m	Sedimentación
6	3.06	0.0 m	Sedimentación
7	3.05	7.5 m	Socavación
8	3.26	8.1 m	Socavación
9	3.11	9.3 m	Socavación
10	3.36	8.7 m	Socavación
11	3.56	11.8 m	Socavación

Finalmente podemos observar si el nivel de diseño para las estructuras fue el adecuado. Se registraron los niveles de agua y se compararon con los niveles de diseño de los espigones (ver Tabla 4.16). La elevación de tirante indica que los espigones mantuvieron la condición de no sumergibles con un borde libre de 2 m aproximadamente. Estos espigones impidieron el flujo lateral por encima de ellos contrariamente a la anterior alternativa.

Tabla 4.16. Tirantes registrados en los espigones del Ensayo 4.

# Espigón	Elevación Espigón (m.s.n.m)	Elevación Tirante (m.s.n.m)
1	184.2	182.3
2	184.2	182.0
3	184.2	181.8
4	184	181.7
5	184	181.6
6	184	181.6
7	183.8	181.5
8	183.8	181.5
9	183.8	181.4
10	183.6	181.4
11	183.6	181.3

4.3.2.3. Discusión de La alternativa de diseño N°2

Los resultados nos indican que los espigones influyen determinante sobre la hidrodinámica y morfología del río. Los 11 espigones logran reducir las velocidades del flujo dentro del campo de los espigones, favoreciendo la sedimentación; y redireccionan el flujo fuera de esta zona, alejando la erosión de la margen derecha. Evidenciándose mediante la reducción porcentual de hasta 78 % en la zona de campo de espigones; y en los taludes que presentan una ligera sedimentación o permanecen inalterados.

Sin embargo, lo contraproducente del esquema de diseño fue el incremento alto de velocidades debido a la constricción del flujo. Esto sucedió aguas abajo del espigón 6 y fuera de la zona protegida con espigones. En esta zona se registraron; incrementos porcentuales de velocidad de hasta el 47.8 % y alta turbulencia en la punta del espigón con velocidades altas de hasta 3.56 m/s. Esto a su vez

generó la degradación general del cauce y una alta socavación en la punta de los 5 últimos espigones con valores de hasta 11.8m.

La constricción del flujo se da de forma natural en la zona final del tramo curvo debido un estrechamiento del cauce. Sin embargo, cuando se introducen espigones se reduce mucho más el área hidráulica, ocasionando altas velocidades y una mayor socavación. En el caso de este esquema los últimos 5 espigones lo sufrieron, pero eventualmente esto es un problema que volverá a presentarse. Inversamente en la zona de ingreso al tramo curvo del río el área hidráulica es mayor y el área que ocupan los primeros 6 espigones generan una menor constricción de flujo y por lo tanto sufren una menor socavación local.

Es necesario mencionar que el área hidráulica que ocupan los espigones depende en gran medida de la longitud de trabajo de los espigones. En el segundo esquema, la longitud de trabajo de los espigones varió entre 41.9 m y 70.1 m (9.9 % y 16.5 % del ancho medio del río). Estas longitudes son menores que la de la alternativa anterior, pero sufrieron de una mayor socavación.

Al observar los patrones de flujo y secciones topográficas, se verificó que la extensión de trabajo de los espigones brindó protección donde se necesitó. La protección fue correctamente extendida de 1.36 km a 1.45 km de longitud, para cubrir el tramo entre las secciones EX04_09 a EX04_10 que no había sido protegida en el esquema anterior. De este modo las mayores velocidades fueron alejadas de la margen derecha consiguiendo que la erosión también se alejará en esta zona.

También podemos mencionar que el alineamiento del río y la construcción de la nueva orilla virtual usando 2 radios de curvatura fue el adecuado. En vista de que permitieron que los espigones se ajusten de mejor forma a la tendencia natural del río, pero sin dejar de proteger la margen eficientemente. Las longitudes de trabajo se crean por la separación entre la orilla virtual y el alineamiento del río; en el caso de este esquema, ocasionaron longitudes más uniformes que en el ensayo anterior. Sin embargo, puede reducirse la separación entre el alineamiento y la nueva orilla virtual; para generar longitudes de trabajo menores en los últimos espigones y así minimizar la socavación en su punta.

Del otro lado, todos los espigones deberían poseer orientación perpendicular al flujo para permitir longitudes de trabajo más cortas y de esta forma también disminuir costos de construcción. En este ensayo no se ha demostrado aspectos teóricos acerca de que los espigones inclinados hacia aguas abajo atraen la corriente hacia la zona protegida y tampoco que minimizan la erosión en la punta. Pues el primer y último espigón tuvieron una inclinación de 120 hacia aguas abajo y mostraron comportamientos diferentes. La socavación en la punta del espigón no existió en el caso del primer espigón, pero en el último fue crítica (11.8 m); así mismo ambos espigones alejaron el flujo acelerado fuera del campo de espigones. Al parecer para los espigones de la clase permeable (en este caso de ~35 %), esto está más fuertemente vinculado a la distribución de espigones y el área hidráulica que reducen los espigones que a los anteriores aspectos teóricos.

Se creó una mejor distribución de espigones a lo largo de la extensión de trabajo; al utilizar ángulos de desviación de flujo más uniformes que en el anterior esquema. Los ángulos variaron entre 14° y 15° grados creando separaciones entre 2 a 3 veces la longitud de trabajo. Podemos comentar que la separación de espigones puede ser reducida para evitar crear meandros entre espigones, reducir más las velocidades del flujo en el campo de espigones, y también para alejar un poco más la socavación en la punta de los espigones.

Así mismo la condición de no sumergencia para este esquema de diseño se cumplió. El nivel de diseño de los espigones no fue sobrepasado por el nivel de tirante del río, creando un borde libre de más de 2m. Esto impide el ingreso directo de un flujo lateral por encima del espigón, asegurando una zona calma en la zona de espigones.

Para finalizar el análisis, se corrobora lo observado en el anterior ensayo al señalar que las características de diseño individual de espigones han funcionado correctamente. Estas características son el ancho del espigón, la longitud de empotramiento, la altura del entramado embebido en el lecho y la permeabilidad. Con respecto a la longitud de anclaje del espigón y la altura del entramado

empotrado en el lecho. Se ha verificado en las secciones topográficas, que la longitud de anclaje es mayor a los cambios morfológicos que suceden en esta zona; y por lo tanto es la adecuada. Del mismo modo se verificó que la altura del entramado empotrado en el lecho (~3m) no cubre la socavación en la punta de los espigones 7 a 11 (3.5 m a 11.8 m). Sin embargo, mantener su altura es lo adecuado debido a que; la socavación decrece hacia el talud, solo unos cuantos espigones lo sufren y el aporte a estabilidad que brinda esta altura es muy poca.

4.3.3. Ensayo N°6 ($Q_p = 14341 \text{ m}^3/\text{s}$)

4.3.3.1. Características de la alternativa de Diseño N°3:

Esta tercera alternativa de diseño se caracterizó por poseer espigones de la clase no sumergidos con un borde libre de aproximadamente 2m. El nivel de diseño superó el nivel de tirante para un periodo de retorno de 50 años, con el fin de cubrir excedencias de flujo durante las máximas avenidas. Así mismo, la alternativa se caracterizó, por disponer de espigones formados con entramados de troncos con permeabilidades que oscilan entre el 33% y 37%.

Cada espigón posee su propia longitud de trabajo, longitud de empotramiento, ancho y altura de diseño. La longitud de empotramiento tuvo valores entre el 6 al 11% de la longitud de trabajo de los espigones. Mientras que el ancho del espigón es de 20 m con el fin de evitar su esbeltez. Así mismo, la altura total del espigón varía entre los 21.9 y 26.7 m. Esta altura la conforman una altura sumergida, un borde libre de ~2 m y una altura empotrada en lecho de ~ 3 m. Finalmente los pilotes poseen una altura final que sobresale hasta 1 m por encima de la altura de diseño y se hincan al suelo hasta una longitud de ~ 15 m (ver Tabla 4.17).

Tabla 4.17. Características geométricas de los 12 espigones del tercer esquema de diseño.

# Espigón	Elevación (m.s.n.m)	Prof. Pilote (m.s.n.m)	Altura (m) Entramado	Ancho (m)	Empotramiento Longitud (m)	Permeabilidad (%)
1	184.2	149.4	23.1	20.0	4.0	33.5
2	184.2	150.6	21.9	20.0	3.7	33.8
3	184.2	148.8	24.3	20.0	4.5	36.2
4	184.0	148.0	24.3	20.0	4.7	37.3
5	184.0	147.4	25.5	20.0	4.1	36.8
6	184.0	146.4	25.5	20.0	3.8	36.9
7	183.8	146.2	26.7	20.0	4.7	36.0
8	183.8	146.2	25.5	20.0	5.1	37.4
9	183.8	146.2	26.7	20.0	4.9	36.5
10	183.6	146.0	25.5	20.0	4.9	35.7
11	183.6	147.0	25.5	20.0	5.7	34.2
12	183.6	147.0	25.5	20.0	4.1	34.2

El esquema de diseño se construyó inicialmente a partir del trazo geométrico del alineamiento del río y la determinación de la nueva orilla virtual. El alineamiento es el mismo del ensayo anterior; y se construyó utilizando 2 círculos circunscritos matemáticamente a la orilla natural (margen cóncava) con radios de curvatura de 1490.5 m y 906.0 m. Mientras que la orilla virtual fue construida con dos nuevos arcos paralelos a este alineamiento con radios de curvatura de 1447.5 m y 850.0 m (ver Anexo10). Adicionalmente, se decidió incrementar ligeramente la extensión de trabajo de espigones hacia aguas abajo a una longitud de 1.5 km; con el fin de adicionar protección en el tramo final entre las secciones EX06_09 a EX06_10.

El número de espigones del esquema fue 12, espaciados a lo largo del cauce utilizando la teoría de ángulo de desviación de flujo y orientación del espigón. La orientación de los espigones con respecto al flujo fue de 90 grados para los 12 espigones. La elección de optar por una inclinación perpendicular al flujo fue para obtener longitudes de trabajo que resultan en un menor costo. Así mismo, los ángulos

de desviación de flujo fueron de 15° y 17° con el fin de crear una separación uniforme en el cauce. Con ambos se obtuvieron espaciamientos entre espigones de 2 a 5 veces la longitud de trabajo (ver Tabla 4.18).

Tabla 4.18. Características geométricas del Esquema de diseño para el ensayo N°6.

Espigón	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo entre Espigones	Ángulo de Desviación Flujo (α)	Espaciamiento entre Espigones
1	40.5 m	90 °	1490.5 m			
				1-2	15 °	137.7 m
2	42.6 m	90 °	1490.5 m			
				2-3	19 °	111.2 m
3	62.1 m	90 °	1490.5 m			
				3-4	17 °	123.4 m
4	57.0 m	90 °	1490.5 m			
				4-5	17 °	123.4 m
5	62.5 m	90 °	1490.5 m			
				5-6	16 °	130.3 m
6	29.9 m	90 °	906.0 m			
				6-7	15 °	155.2 m
7	52.9 m	90 °	906.0 m			
				7-8	15 °	155.2 m
8	60.6 m	90 °	906.0 m			
				8-9	15 °	155.2 m
9	63.5 m	90 °	906.0 m			
				9-10	15 °	155.2 m
10	56.0 m	90 °	906.0 m			
				10-11	15 °	155.2 m
11	52.2 m	90 °	906.0 m			
				11-12	15 °	155.2 m
12	51.5 m	90 °	906.0 m			

4.3.3.2. Análisis de Resultados

a) Cambios hidrodinámicos y morfológicos que producen las estructuras:

En un inicio, los vectores de velocidad media en su proyección horizontal son representados a lo largo del cauce para indicarnos los patrones del flujo (ver Figura 4.11). En esta representación los vectores con mayor valor numérico han sido colocados de color rojo, para mostrarnos de qué lado del cauce se presentan las mayores velocidades.

Los vectores de velocidades medias muestran un patrón difícil de analizar y diferente al mostrado en el Ensayo N°4. Se observa que los 12 espigones colocados entre las secciones EX06_03 y EX06_10 cambian la dirección de los vectores de velocidad a lo largo del cauce, pero con mayor relevancia en el tramo curvo.

En efecto; a lo largo del tramo recto del río, entre la sección EX06_01 y EX06_02, los vectores ingresan de forma paralela al tramo recto del cauce. Esta orientación se mantiene en el inicio del tramo curvo, entre EX06_02 y EX06_03. Hacia aguas abajo, entre la sección EX06_04 a EX06_08, su orientación cambia para adoptar el alineamiento de la orilla virtual. Luego, al dejar atrás la sección EX06_08 y hasta la sección EX06_11, la mayoría de los vectores vuelven a cambiar su dirección hacia la margen derecha. Desde otra perspectiva, al analizar la ubicación de los espigones entre las secciones mencionadas, vemos que el flujo ha ido reorientándose gradualmente a partir de la posición del espigón 1; pero cuando alcanza la posición del espigón 10 el flujo se dirige hacia la zona de

espigones. Esto implicaría una zona de alta turbulencia entre, aguas abajo del mencionado espigón y hasta la sección EX06_10.

Así mismo podemos ver la posición de los mayores vectores de velocidad. El flujo ingresa en la sección EX06_1 con velocidades ligeramente mayores en el centro del cauce; y cuando alcanza la sección EX06_2, las velocidades toman su mayor valor del lado de la margen izquierda. Hacia la sección EX06_03 el flujo está ingresando hacia la zona curva con magnitudes mayores de velocidad en la zona izquierda y al centro del cauce. Llegando a la sección EX06_04 y hasta EX06_10 el flujo ya es acelerado hacia el centro del cauce y al límite de la punta de los espigones. Ya a la salida del cauce, en la sección EX06_11, las velocidades toman su mayor valor hacia el lado derecho y centro del cauce.

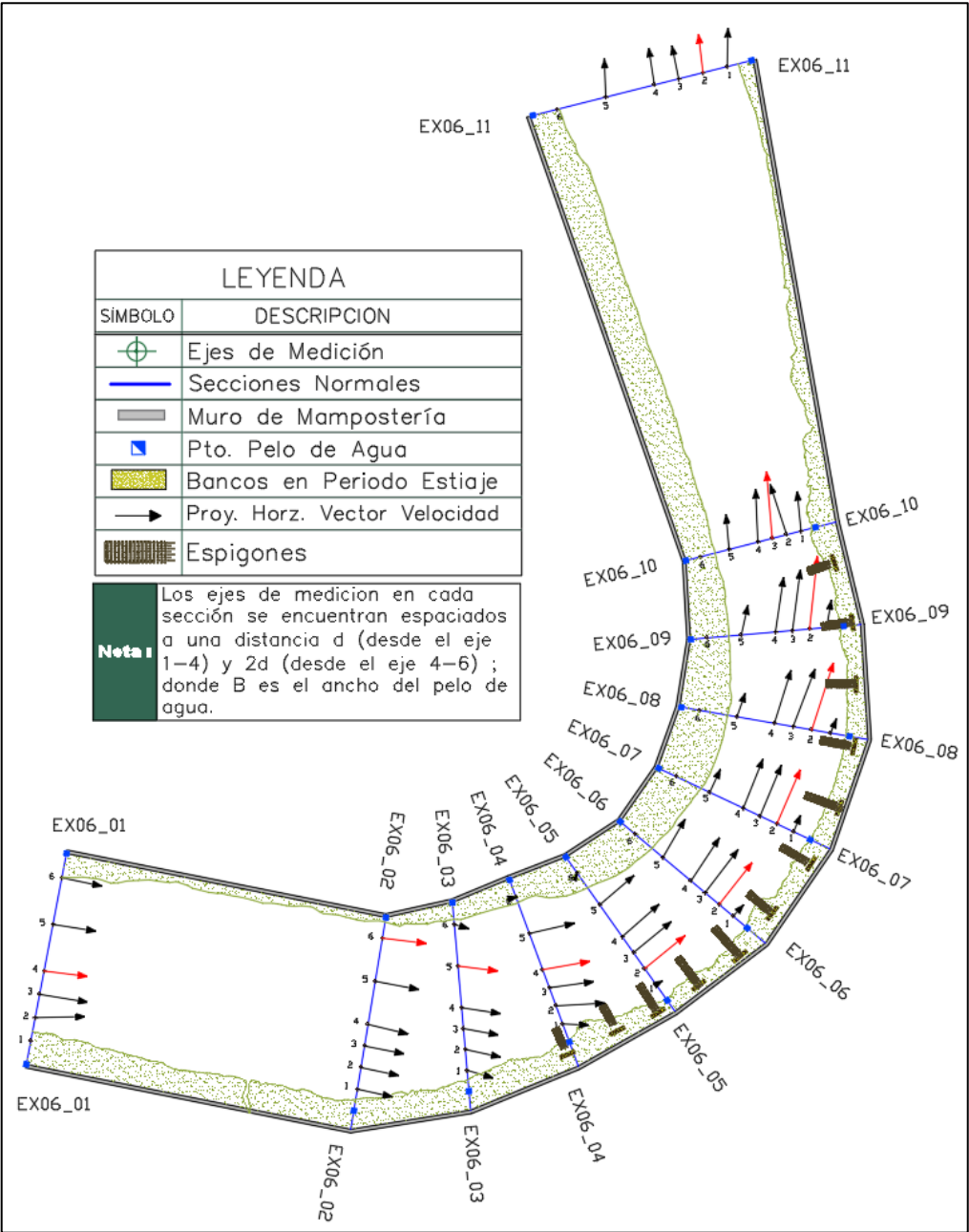


Figura 4.11. Proyección horizontal de vectores de velocidades para el Ensayo N°6.

Siguiendo con el análisis y al igual que los ensayos anteriores; los valores numéricos de los vectores que señalaban los patrones de flujo, son mostrados en una tabla (ver Tabla 4.19). En dicha tabla se

puede apreciar más claramente su diferenciación; y se puede constatar la localización de los mayores vectores de velocidad del flujo (señaladas de color rojo).

Si observamos los valores, existe una disminución de velocidades en la zona de campo de espigones, entre la sección EX06_04 y hasta EX06_09, con valores entre 0.41 m/s y 1.64 m/s. Pero también existe una clara aceleración del flujo en la punta de los espigones (eje 2), con valores que ascienden gradualmente desde 2.57 m/s (Espigón 1) hasta 3.89 m/s (Espigón 11), y vuelven a descender a 2.97 m/s (Espigón 12). Otra cosa importante de señalar, es que en la punta del espigón 11 es donde el flujo toma su máximo valor de 3.89 m/s en todo el cauce.

Tabla 4.19. Valores Numéricos de Velocidades medias en prototipo m/s para el Ensayo N°6.

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX06_1	0.02	2.36	2.83	2.63	2.77	2.44
EX06_2	2.47	2.38	2.35	2.20	2.33	1.98
EX06_3	1.65	1.94	2.02	2.20	2.27	0.98
EX06_4	1.40	2.57	2.54	2.59	2.56	0.08
EX06_5	0.41	2.95	2.87	2.72	2.59	0.28
EX06_6	0.82	3.06	3.04	2.90	2.48	0.09
EX06_7	1.23	3.32	3.05	2.83	1.38	0.03
EX06_8	0.93	3.70	3.45	3.00	1.52	0.01
EX06_9	1.64	3.89	3.40	3.04	1.72	0.01
EX06_10	2.30	2.97	3.76	3.06	2.04	0.12
EX06_11	2.27	2.40	2.04	2.09	2.09	0.29

Desde otro punto de vista, podemos relacionar porcentualmente las velocidades obtenidas del ensayo 5 (ver Tabla 4.3 y título 5.2) con respecto a las obtenidas en este ensayo. De esta forma podemos hablar de un incremento o reducción de las velocidades a lo largo del cauce por la presencia de espigones (ver Tabla 4.20).

Tabla 4.20. Variaciones Porcentuales de Velocidades medias del Ensayo 5 con respecto al Ensayo N°6.

Sección	EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5	EJE 6
EX06_1	205.1%	-9.3%	9.5%	13.7%	20.4%	12.7%
EX06_2	37.1%	16.3%	11.8%	1.0%	-1.6%	-16.0%
EX06_3	-21.3%	-9.1%	-9.9%	-6.9%	7.0%	-21.6%
EX06_4	-46.9%	-8.2%	5.8%	-1.0%	4.1%	-65.8%
EX06_5	-86.7%	0.0%	5.8%	-0.2%	4.0%	102.9%
EX06_6	-74.6%	4.0%	3.7%	-2.9%	4.1%	-52.5%
EX06_7	-63.1%	5.8%	-2.3%	-0.7%	-37.4%	-59.8%
EX06_8	-74.7%	6.3%	26.7%	23.2%	-5.8%	-38.6%
EX06_9	-60.1%	1.5%	10.0%	7.4%	19.5%	56.8%
EX06_10	-51.4%	-31.6%	6.3%	1.9%	3.1%	-58.9%
EX06_11	8.8%	-10.4%	-9.7%	5.0%	19.0%	273.2%

Del lado de la margen derecha del río (eje1) y entre las secciones EX06_4 a EX06_10 (donde se encuentra la zona de campo de espigones); podemos observar una reducción porcentual de las velocidades del flujo con porcentajes entre 46.9 % y 86.7%. Contrariamente, hacia la punta de los

espigones (eje 2) sucede una aceleración del flujo; con incrementos porcentuales de hasta 6.3 % entre las secciones EX06_4 a EX06_10. Del mismo modo el flujo en el centro del cauce, fuera de la zona protegida y hasta la sección EX06_10; sufre de un incremento de velocidades debido a la reducción de la sección hidráulica. Esto se puede apreciar de forma más clara entre las secciones EX06_8 a EX06_10; donde se alcanza el incremento porcentual más alto registrado de 26.7 %.

Cabe mencionar que, del lado de la margen izquierda y entre la sección EX06_1 a EX06_11, existen incrementos y reducciones porcentuales importantes del flujo. Estos porcentajes poseen valores de signos aleatorio, pero también tienen origen en valores numéricos bajos. Las velocidades poseen estos valores debido a que la batimetría del río es compleja, los tirantes son bajos y la turbulencia es alta. Lo mismo sucedió en la sección de ingreso, en el Eje de medición 1, en donde se redujo la velocidad en un 205.1 %.

Desde lo mencionado, los 12 espigones se comportan de forma eficiente al reducir las velocidades en la zona de protección; pero contrariamente lo aceleran en la punta de espigones y hacia el centro del cauce. Así mismo, los mayores incrementos se produjeron entre la posición de los espigones 9 a 12 indicando que en esta zona se estaría produciendo una mayor turbulencia.

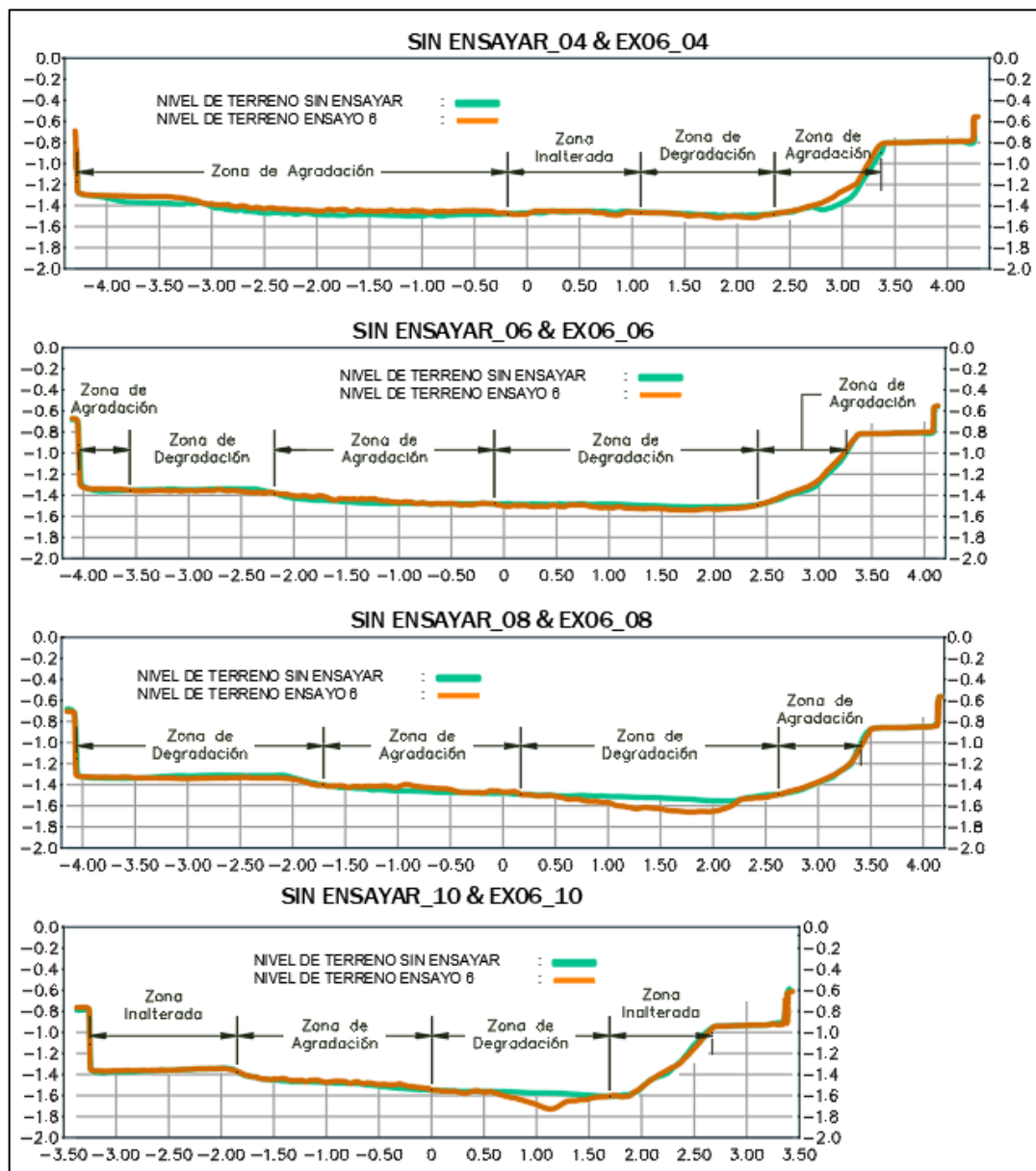


Figura 4.12. Comparación cualitativa de la Batimetría N°6 y Batimetría Sin Ensayar.

Para finalizar, en secciones topográficas se presentan los niveles de terreno de la Batimetría del Ensayo N°6 y la Batimetría Sin Ensayar (ver Figura 4.12 y Anexo14). Con el fin de que se pueda observar los cambios morfológicos que ocurren a lo largo del cauce (agradación o degradación). Convenientemente para su diferenciación, a la primera se le asignó el color mostaza y a la segunda el color verde.

Si observamos las secciones, los procesos de agradación y degradación del cauce resultan difícil de analizar debido a que se presentan de forma alternada. El único factor común en todas estas secciones es que del lado de la margen derecha, entre las secciones EX06_4 y EX06_10, el cauce sufre de agradación o permanece inalterado. En su tramo inicial, entre las secciones EX06_01 a EX06_03, el cauce sufre de agradación principalmente. Al finalizar el cauce, la agradación se presenta del lado de la margen izquierda y del lado de la margen derecha se degrada.

Lo mencionado nos indica que los espigones cumplen con su objetivo de alejar la erosión que se genera al pie del talud; pero a su vez generan cambios morfológicos importantes en el cauce del río debido a la constricción del flujo que producen. Otra cosa importante de mencionar es que existe una gran profundización del cauce en zona central a partir de la sección EX06_07 e inmediatamente hacia aguas abajo de la sección EX06_10; como consecuencia de la redirección del flujo por la presencia de espigones. Esto es favorable en el sentido de protección, pero resulta contraproducente porque representa problemas de socavación de la punta de los espigones.

b) Velocidades, tirantes y cambios morfológicos que se presentan alrededor de las estructuras

En un inicio se analizan los cambios morfológicos que se producen bajo cada espigón. Para lo cual, se utilizan secciones topográficas que atraviesan el centro de los espigones y muestran los niveles de terreno para la batimetría Sin Ensayar con la de este Ensayo (ver Figura 4.13 y en Anexo17).

En las secciones topográficas de cada espigón, los cambios morfológicos que se presentan en los taludes corresponden primordialmente a los de sedimentación y solo unos pocos a la erosión; estos últimos con valores menores a 1 m. Esto indica que los espigones al reducir la velocidad en la zona de campo de espigones, reducen los procesos erosivos en el talud. De este modo la longitud de empotramiento de los espigones no ha sido sobrepasada y por lo tanto es la adecuada (ver Tabla 4.17).

Tabla 4.21. Velocidades medias y variación de niveles registrados en la punta de los espigones, para el Ensayo N°6.

Espigón	V _{MEDIA} (m/s)	Δ Niveles	Comentario
1	2.38	2.1 m	Socavación
2	1.70	1.2 m	Socavación
3	2.24	2.5 m	Socavación
4	2.46	0.8 m	Socavación
5	2.38	0.8 m	Socavación
6	2.36	1.2 m	Socavación
7	2.74	1.3 m	Socavación
8	2.72	4.5 m	Socavación
9	3.00	4.3 m	Socavación
10	2.86	4.5 m	Socavación
11	3.16	4.0 m	Socavación
12	3.65	5.8 m	Socavación

Desde otro enfoque podemos observar si se presenta o no socavación en la punta del espigón. Las secciones indican que los procesos erosivos han ocasionado una seria socavación al pie de los 5 últimos espigones. Esta socavación no se presenta solo de forma vertical, sino que avanza decrecientemente hacia la margen derecha invadiendo la longitud de trabajo.

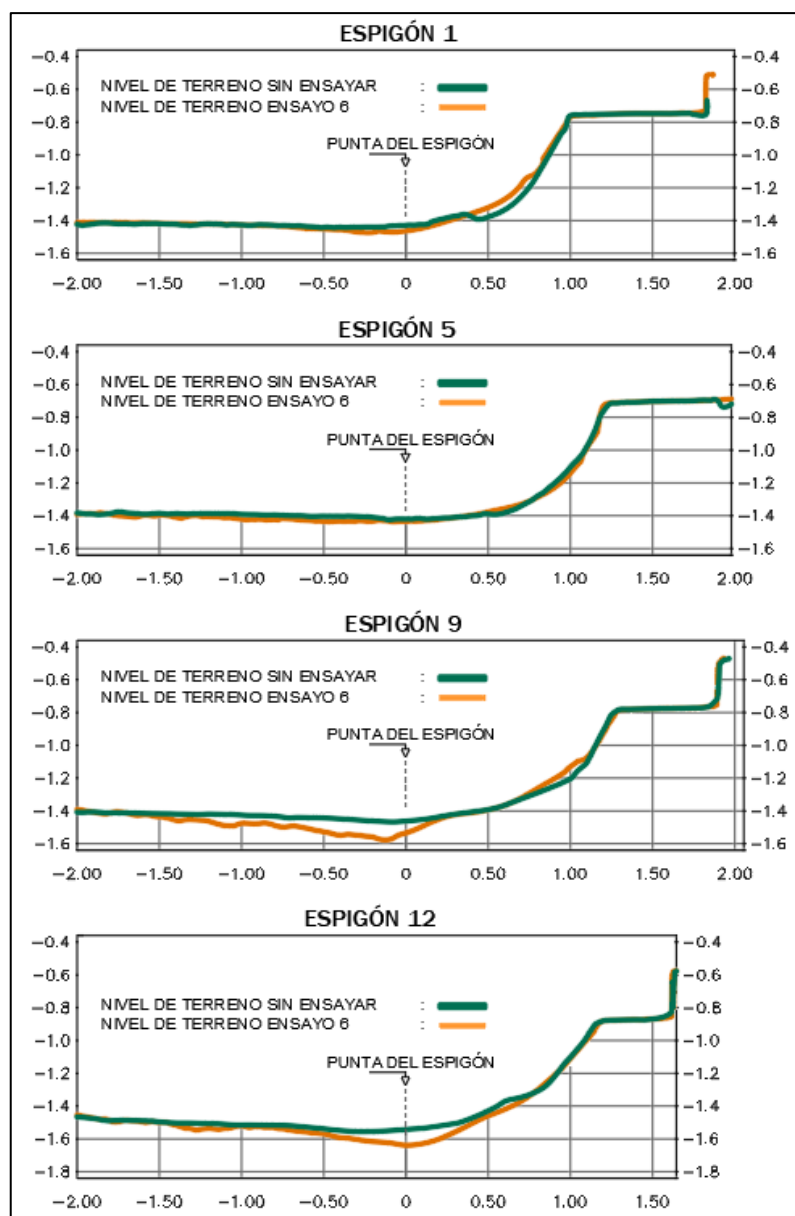


Figura 4.13. Secciones de Espigones del Esquema de Diseño 3. Comparación de la Batimetría N°6 y Batimetría Sin Ensayar.

Para constatar lo observado, se midió de forma vertical al pie de la punta de los espigones la diferencia de niveles entre la batimetría sin ensayar y la de este ensayo. De modo que se obtuvieran valores de niveles de sedimentación o socavación (ver Tabla 4.21).

Los valores de la Tabla 4.21 indican que todos los espigones presentan socavación, pero los valores resultan relevantes en los espigones 8 a 12. Así mismo, el valor máximo de socavación es para el espigón 12 con una altura de 5.8 m; que es un valor superior a los 3 m de entramado de troncos enterrado en el lecho. Adicionalmente, si nosotros comparamos estos datos con los de la longitud de trabajo de la Tabla 4.18, verificamos que no se cumple la relación directa entre longitud de trabajo y socavación en la punta del espigón.

En la misma tabla también se muestran las velocidades registradas en la punta del espigón la cuales se relacionan con el grado de socavación que se presenta. En este caso los valores de velocidad fueron registrados durante el ensayo a una longitud de 9 a 20 cm desde su punta. Estos valores nos indican cuán acelerado es el flujo en esta zona debido a la constricción del flujo.

Los valores de velocidad en la Tabla 4.21 nos indican que el flujo en la punta del espigón es mucho más veloz que el presentado en la zona de campo de espigones (ver eje 1 en la Tabla 4.19). Estos valores se mantienen en el rango de 1.70 m/s a 3.65 m/s, siendo su máximo registrado en el espigón 12 y su mínimo en el espigón 2. También observamos, que no se mantiene la relación directa entre velocidad media y la variación de niveles en todos los espigones; en el sentido que donde hay mayor velocidad se presenta mayor socavación. Esto se debe en gran parte a la complejidad de la hidrodinámica del cauce y los procesos de transporte de sedimentos.

Tabla 4.22. Tirantes registrados en los espigones del Ensayo 6.

# Espigón	Elevación Espigón (m.s.n.m)	Elevación Tirante (m.s.n.m)
1	184.2	182.6
2	184.2	182.3
3	184.2	182.2
4	184	182.1
5	184	182.0
6	184	181.9
7	183.8	181.9
8	183.8	181.8
9	183.8	181.8
10	183.6	181.7
11	183.6	181.7
12	183.6	181.6

Finalmente podemos observar si el nivel de diseño para las estructuras fue el adecuado. Se registraron los niveles de agua y se compararon con los niveles de diseño de los espigones (ver Tabla 4.22). La elevación de tirante indica que los espigones mantuvieron la condición de no sumergibles con un borde libre de 2 m aproximadamente. Estos espigones impidieron el flujo lateral por encima de ellos de igual forma que la anterior alternativa.

4.3.2.3. Discusión de La alternativa de Diseño N°3

Los resultados nos indican que los espigones influyen determinante sobre la hidrodinámica y morfología del río. Los 12 espigones logran reducir las velocidades del flujo dentro del campo de los espigones, favoreciendo la sedimentación; y redireccionan el flujo fuera de esta zona, alejando la erosión de la margen derecha. Evidenciándose mediante la reducción porcentual de hasta 87 % en la zona de campo de espigones; y en los taludes que presentan una ligera sedimentación o permanecen inalterados.

Sin embargo, lo contraproducente del esquema de diseño fue el incremento de velocidades debido a la constricción del flujo. Esto sucedió aguas abajo del espigón 5 y fuera de la zona protegida con espigones. En esta zona se registraron; incrementos porcentuales de velocidad de hasta el 26.7 % y alta turbulencia en la punta del espigón con velocidades altas de hasta 3.65 m/s. Esto a su vez generó la degradación general del cauce y una mediana socavación en la punta de los 5 últimos espigones con valores de hasta 5.8m.

La constricción del flujo se da de forma natural en la zona final del tramo curvo debido un estrechamiento del cauce. Sin embargo, cuando se introducen espigones se reduce mucho más el área hidráulica, ocasionando altas velocidades y una mayor socavación. Esto es algo que solo se puede reducir, pero no evitar, y queda demostrado en la socavación de los últimos 5 espigones de este esquema. Contrariamente, en la zona de ingreso al tramo curvo del río el área hidráulica es mayor y

la constricción que generen será menor. Lo cual también queda demostrado en los 7 primeros espigones que sufren de una menor socavación local.

El área hidráulica que ocupan los espigones depende en gran medida de la longitud de trabajo de los espigones. En esta alternativa tuvieron valores entre los 29.9 m y 63.5 m (7.1 % y 15 % del ancho medio del río). Estas longitudes son similares a la alternativa anterior, ocasionaron una similar aceleración del flujo; pero tuvieron una menor socavación.

La construcción del alineamiento del río se hace a partir del ajuste de la orilla natural, y la orilla virtual se construye paralelamente al alineamiento. En esta alternativa se decidió reducir en 2 m la separación entre la orilla virtual y el alineamiento. Con el fin de reducir la longitud de trabajo del primer espigón (reorientado a 90°) y por ende su socavación; pero sin disminuir el alcance de protección del mismo. Así mismo, se utilizó el mismo alineamiento del esquema anterior porque se ajustaba correctamente a la orilla natural.

Es necesario mencionar, que el alineamiento tiene como consigna ajustarse a las condiciones naturales del río sin embargo esto no puede ser perfectamente realizado. Por eso, la orilla natural resulta ser más convexa que el alineamiento del río en el tramo EX06_04 a EX06_6. Lo cual ocasiona que cuando se disponga de espigones en esta zona y con espaciamientos entre ellos grandes, el flujo no se desvíe correctamente. Por lo tanto, en este esquema, se decidió correctamente reducir la separación de los 6 primeros espigones y mantener la separación de los 6 restantes. De esta forma se utilizarían ángulos de desviación de flujo entre 15 y 19 grados para crear separaciones entre 2 a 5 veces la longitud de trabajo de espigones.

Otra decisión correcta fue orientar los espigones de forma perpendicular al flujo. Porque de este modo las longitudes de trabajo fueron más cortas y por lo tanto se disminuye el costo de construcción. Al igual que el ensayo anterior, para el caso de espigones permeables el ángulo de orientación no determina el grado de socavación del mismo.

La distribución geométrica de espigones usando los criterios mencionados generó un ligero incremento de 1.5 km de la extensión de trabajos de espigones. Lo cual es bueno porque se adiciona la protección que se requiere al final del tramo curvo (entre las secciones EX06_09 a EX06_10).

Del otro lado, la condición de no sumergencia para los espigones fue cumplida durante el ensayo experimental. El nivel de diseño de los espigones no fue sobrepasado por el nivel de tirante del río, creando un borde libre de más de 2m. Esto impide el ingreso directo de un flujo lateral por encima del espigón, asegurando una zona calma en la zona de espigones.

Para finalizar la discusión, se corrobora lo observado en el anterior ensayo al señalar que las características de diseño individual de espigones han funcionado correctamente. Con respecto a la longitud de anclaje del espigón y la altura del entramado empotrado en el lecho. Se ha verificado en las secciones topográficas, que la longitud de anclaje es mayor a los cambios morfológicos que suceden en esta zona; y por lo tanto es la adecuada. Del mismo modo se verificó que la altura del entramado empotrado en el lecho (~3m) no cubre la socavación en la punta de los espigones 8 a 12 (4.0 m a 5.8 m). Sin embargo, mantener su altura es lo adecuado debido a que; la socavación decrece hacia el talud, solo unos cuantos espigones lo sufren y el aporte a estabilidad que brinda esta altura es muy poca.

A partir de este punto, este esquema de diseño es el adecuado y solo requeriría del refinamiento del cálculo de estabilidad para el total de los espigones.

CONCLUSIONES

En esta tesis se Diseñó los espigones Fabricados con Troncos de Árboles en el tramo del Río Madre de Dios denominado La Pastora (Puerto Maldonado). Además, se explicó su proceso de modo que se deja un precedente para futuros proyectos de restauración de ríos en la selva peruana.

Desde los objetivos planteados en esta tesis obtenemos las siguientes conclusiones:

- Mediante el estudio de la migración de meandro la pastora se determinó que el círculo circunscrito que describe al meandro La pastora; se ha desplazado aceleradamente en los últimos 15 años a una tasa de 8 m/año y ha reducido su radio a 1110.6 m. Así mismo se predice que el meandro en el año 2025 mantendrá esta aceleración y reducirá su radio a 1056.5m. Esto refleja un cambio importante en la morfodinámica del río en los últimos 15 años y representará un riesgo mayor sobre las estructuras que se ubiquen del lado de la margen externa del meandro. Esta migración lateral inevitablemente alcanzara a la carretera interoceánica sur; por lo tanto, es necesario construir una defensa ribereña.
- La recopilación de información fidedigna de los estudios hidrológicos, hidráulicos, topografía y de suelos, fueron fundamentales para iniciar el diseño de los espigones. Con estos se pudo comprobar de forma específica la problemática actual del tramo del río estudiado, y también comprender las variables del flujo y parámetros del cauce.
- La geometría y disposición de los troncos que conforman la arquitectura de un espigón fue de elaboración propia y ha funcionado correctamente. Esta toma su concepto de la tecnología foránea de los espigones ELJs y los adapto a las condiciones del Río Madre de Dios. Experimentalmente se demostró que mientras se mantenga su estabilidad en el cauce estos lograran eficientemente reducir las velocidades del flujo en la zona de campo de espigones, favoreciendo la sedimentación. Así mismo, lograrán desviar la corriente alejando los procesos erosivos en la margen derecha.
- Los criterios de diseño de espigones no deben considerarse como reglas estrictas; por lo tanto, es necesario su evaluación para ser aplicados de forma correcta dentro del diseño. Solo deben considerárseles como un punto de partida para crear un primer esquema de diseño, el cual deberá ser validado y mejorado mediante ensayos.
- El análisis de estabilidad de la estructura indica que las piezas esenciales para generar estabilidad son los pilotes y la madera incrustada en el talud. La primera a través de las fuerzas pasiva y activa del material de relleno en la zona de anclaje; y la segunda a partir del fuste del espigón y la resistencia lateral, uno en mayor medida que el otro. Sin embargo, estas no resultan ser suficientes, ocasionando que los espigones no sean estables por sí solos. Por lo tanto, es necesario encontrar materiales o métodos que ayuden a crear dicha estabilidad.
- La principal fuerza desestabilizadora que afecta a los espigones es la de arrastre. Debido a que las dimensiones de los espigones, generan una sección expuesta en contra del flujo de gran envergadura; ocasionando, en su proceso de cálculo, un valor alto que incluso supera a la fuerza de empuje. Aunque el proceso de diseño requiere que la estabilidad vertical sea asegurada inicialmente, para luego alcanzar la horizontal; la estabilidad total no se logrará sino se adiciona más pilotes y/o algún material de lastre. Desde esta perspectiva, si no se posee los materiales suficientes o el costo se eleva, se recomienda utilizar los espigones fabricados con troncos en ríos de menor envergadura.
- El Modelamiento hidráulico físico del río (con y sin estructuras) es un paso fundamental dentro de la metodología de diseño de espigones. Sus resultados nos permiten ajustar geométricamente cada esquema o alternativa de diseño para alcanzar la meta del proyecto, minimizando los riesgos asociados con el mismo. Esto a partir de la comprensión del grado de alteración que producen los espigones sobre la hidrodinámica y morfología del río.

- Los resultados obtenidos de la etapa experimental correspondientes a los ensayos sin estructuras, corroboran la problemática del meandro la pastora. Del lado de la margen derecha se registraron velocidades de hasta 4.74 m/s y se presentó una erosión en el cauce con valores de hasta 7 m. Lo cual ha ido generando el colapso de sus taludes y por consiguiente el avance lateral de la orilla.
- De los resultados de la etapa experimental, correspondientes a los ensayos con estructuras, se concluye que una tercera alternativa de diseño fue la que mejor resultados ofrece en términos de protección de la margen derecha y reducción en la socavación de espigones. Esta alternativa ocasionó una reducción porcentual de velocidades de hasta el 87 % en la zona de campo de espigones, un incremento porcentual fuera de la zona de espigones de hasta el 27 % con un valor máximo registrado de 3.89 m/s, y una mediana socavación en la punta de los espigones de hasta 5.8 m. Siendo los criterios de diseño empleados los siguientes:
 - Permeabilidad total de los espigones de alrededor del 35% , dividida en tramos de permeabilidades que disminuye hacia el talud.
 - Espigones no sumergibles, con borde libre de 2m.
 - Ancho del espigón de 20m, similar al nivel de tirante de diseño.
 - Longitud de trabajo menores al 15 % del ancho medio del río.
 - Longitud de anclaje menores al 11 % de la longitud de trabajo.
 - Uso de dos radios de curvatura para crear el alineamiento del río y la orilla virtual.
 - Espigones con orientación perpendicular a la dirección del flujo del río.
 - Uso de ángulos de desviación de flujo entre 15° a 19 ° que generaron separaciones de 2 a 3 veces la longitud de separación entre la orilla virtual y el alineamiento.
- Los criterios mencionados anteriormente forman ahora parte del estado del arte de diseño de espigones; y podrán ser utilizados, mediante su evaluación, en futuros proyectos de control de erosión de bancos de ríos en la selva peruana.

RECOMENDACIONES

- El estudio de la migración de meandro la pastora, utilizó la metodología de secuencia y extrapolación de mapas, fotografías o imágenes satelitales empleada por el Ing. Lagasse et. al en el 2004 para la NCHRP de USA. Se recomienda este tipo de estudios, que son prácticos, cuando se requiere estudiar la geomorfología de un río, para determinar el alcance del proyecto de una obra hidráulica, y para evaluar los riesgos de daños a infraestructuras públicas y privadas que se localizan a lo largo del cauce del río.
- Es necesario recopilar más información acerca de la disponibilidad de material de madera en la selva peruana de acuerdo a su zona de crecimiento y a sus propiedades físicas. De modo se cuente con un banco de materiales listo para utilizarlo en la elaboración de los espigones fabricados con troncos de árboles.
- En esta tesis, la metodología de diseño para el cálculo de estabilidad estructural utiliza coeficientes de seguridad para cubrir o resolver el grado de incertidumbre con respecto al diseño. Estos coeficientes fueron el resultado de la evaluación de riesgo de daño a la propiedad y seguridad pública para ríos de estados Unidos. A partir de lo mencionado, se requiere de estudios para crear coeficientes de seguridad para la selva peruana que tienen características y problemáticas distintas.
- Deben realizarse estudios para determinar correctamente coeficientes de sustentación (lift) y de arrastre (cd) para los espigones fabricados con troncos de árboles. Así mismo mejorar el cálculo de las fuerzas de impacto generado por la carga de madera de los ríos; y el cálculo de las fuerzas pasivas y activas generada en la zona de anclaje del espigón.
- Es necesario reglamentar el empleo de modelos numéricos (desde 1d a 3d) o físicos de acuerdo al nivel de importancia en proyectos hidráulicos en ríos del Perú. Debido a que estos resultan claves para descartar interrogantes de diseño e incertidumbres sobre los mismos. Del mismo modo, se debe comprender que los modelos físicos no pueden ser descartados, pues aun cuando los códigos o algoritmos computacionales han mejorado y la capacidad computacional ha aumentado; no pueden replicar totalmente la complejidad de un flujo tridimensional de un río.
- El investigador debe asegurarse que el presupuesto y tiempos que va a emplear sean los adecuados para su experimentación. En el caso de este modelo físico debido a su gran tamaño y complejidad los costos de acondicionamiento experimental, etapa de ensayos experimentales y procesamiento de datos son realmente elevados. Como consecuencia se restringieron compras de equipamiento y mano de obra, ocasionando que cada proceso tuviera un retraso.
- La calibración del modelo físico y el correcto funcionamiento del equipamiento juega un rol importantísimo para obtener datos de muy buena calidad. Durante los ensayos experimentales se produjeron ligeras variaciones de caudales debido al mal funcionamiento de las bombas de impulsión. Desde otra perspectiva los procesos de acondicionamiento experimental y toma de datos están sujetos a errores humanos. Es necesario pensar en comenzar automatizar algunos procesos y adquirir equipamiento más actualizado para asegurar unos buenos ensayos.
- Uno de los principales instrumentos empleados durante la obtención de datos fue el ADV Vectrino Profiler 3D de la marca Nortek. Este equipo funcionó correctamente durante el proceso de toma velocidades; pero después del procesamiento de la data, se observó ruidos y saltos en los diagramas de velocidades. Para minimizar estos errores se recomiendan las siguientes acciones:
 - La concentración de partículas suspendidas en el fluido debe ser buena para no afectar la señal de ruido.
 - Utilizar un soporte estructural que asegure la estabilidad del equipo de modo que se disminuya las vibraciones durante el proceso de medición.

- Siempre que fuera factible evitar emplear el instrumento durante un tiempo tan prolongado con la finalidad de evitar el calentamiento del instrumento
- En la configuración del instrumento es recomendable darle un volumen de muestreo pequeño, y reducir la separación entre la sonda y el volumen mismo para asegurar que el pulso transmitido por la sonda alcance todo el volumen.
- Realizar filtrado en base a coeficientes de correlación y despiking.

Ha aumentado el uso del Vectrino Profiler, y en general de los ADV, como equipo de medición para uso en campo y en experimentación. Como consecuencia se ha abierto un amplio tema por ser estudiado.

- Conforme el equipamiento científico para uso experimental en el Perú va mejorando, se va requiriendo un alto recurso computacional para el procesamiento de datos. Esto ocurrió al trabajar con datos batimétricos que fueron dados en una nube de millones de puntos en formato stl. El procesamiento requería de una computadora con gran memoria RAM y una buena tarjeta de video.
- Cuando el presupuesto es limitado en el mercado existen buenos softwares gratuitos e incluso con código abierto como los empleados en esta investigación:
 - ParaView: Software de código abierto para análisis y visualización de data científica.
 - Freecad: Software de diseño asistido en computadora en tres dimensiones.
 - Blender: Para la animación, modelado y creación de gráficos tridimensionales.
 - Krita: Para edición de imágenes y dibujo profesional.
 - Mesh Mixer: Visualizador y editor de mallas en 3d.
 - Google Earth Pro y QGIS: Sistemas de Información geográfica.
- Finalmente, el proyecto al que pertenece esta tesis de investigación es de nombre “Espigones fabricados con Troncos de Árboles: Una Alternativa contra la Erosión en Ríos Meándricos”. Este proyecto involucró la participación de tesis de postgrado y pregrado de distintas universidades públicas del Perú. Sus investigaciones complementan a la tesis presentada en este documento y recomendamos su lectura:
 - Tesis: “Efectos de Troncos Flotantes captados por un Sistema de Espigones fabricados con Troncos de Árboles en el Meandro del Sector La Pastora-Puerto Maldonado del Río Madre de Dios, 2016” (Walter Chuan, 2019)
 - Tesis: “Simulación Numérica de La Hidrodinámica y Transporte de Sedimentos en el Modelo Hidráulico del Río Madre de Dios” (Luis Castro, 2018)
 - Tesis: “Eficiencia de un Sistema de Espigones Permeables Fabricados con Troncos de Árboles en la Retención de Sedimentos en Ríos Amazónicos” (Jhon Bautista, 2018).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbe, T., y Brooks, A. (2011). Geomorphic, engineering, and ecological considerations when using wood in river restoration. *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems*, 419-451.
- Abdus, S., y Kumar, D. (1999). Spacing of Straight Spurs in Series. *The institution of Engineers, Bangladesh*, 27(2), 175-181.
- Briaud, J.L., Chen, H.-C., Park, S., y Shah, A. (2002). *Meander Migration Rate : Evaluation of Some Existing Methods* (Report 2105-S : Develop Guidance for Design of New Bridges and Mitigation of Existing Sites in Severely Degrading and Migrating Streams). Texas, EE.UU.
- Brooks, A. P. (2006). *Design guideline for the reintroduction of wood into Australian streams, Land & Water Australia*, Canberra.
- Brown, S.A. (1985), *Design of Spur-Type Streambank Stabilization Structures*, Final Report, FHWA/RD-84-101, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Cao, Y., Liu, P., y Jiang, E. (2013). The Design and Application of Permeable Groynes. *Applied Mechanics and Materials*, (353-356), 2502-2505. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2502
- Domínguez, L. G., Farías, H. D., y Reuter, A. F. (2012). *Migraciones del Curso y Forma en Planta observadas en Ríos Meandriiformes de varias Regiones Argentinas*. (Instituto de Recursos Hídricos IRHi, FCEyT). Argentina.
- Gallisdorfer, M. S., Bennett, S. J., Atkinson, J. F., Ghaneizad, S. M., Brooks, A. P., Simon, A., y Langendoen, E. J. (2014). Physical-scale model designs for engineered log jams in rivers. *Journal of Hydro-environment Research*, 8(2), 115-128.
- Heo, J., Duc, T.A., Cho, H., y Choi, S. (2009). Characterization and prediction of meandering channel migration in the GIS environment: A case study of the Sabine River in the USA. *Environ Monit Assess* (152), 155–165. doi: 10.1007/s10661-008-0304-8
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P., García Espejo, M., & Limón Cano, S. (2010). *Fundamentos de la metodología de la investigación*. Madrid: McGraw-Hill.
- Hydraulics Research Wallingford. (1990). *Groynes and training works affecting river planform - a literature review*. (SR.229). Recuperado de <http://eprints.hrwallingford.co.uk/1095/>
- King, H. (2009). The Use of Groynes for Riverbank Erosion Protection. En s.n., *River Hydraulics, Stormwater & Flood management*, Conferencia llevada a cabo en la University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa.
- Knutson, M., y P. Fealko. (2014). *Pacific Northwest Region Resource and Technical Services—Large Woody Material Risk Based Design Guidelines*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Pacific Northwest Region, Boise, Idaho.
- Kumar, R., Kulkarni, D., y Talegaonkar, S.D. (2017). Studies of Spacing of Permeable Spurs in Series. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, 8(5), 750-777. Recuperado de <http://www.iaeme.com/IJCET/issues.asp?JType=IJCET&VType=8&IType=5>
- Laboratorio Nacional de Hidráulica. (2014). *Espigones Fabricados con Troncos de Árboles: Una Alternativa contra la Erosión en Ríos Meándricos*. Lima- Perú.

- Lagasse, P. F., Spitz, W. J., Zevenbergen, L. W., Zachmann, D. W., y INC, O. A . A. (2004). *Handbook for Predicting Stream Meander Migration* (National Cooperative Highway Research, Program REPORT- 533). Washington, D.C. EE.UU.: Transportation Research Board.
- Lila, A., Chaudhari, M., y Korulla, M. (s.f.). *River Trainning Structures- Groyne*s. Maccaferri Environmental Solutions Pvt. Ltd. (n.d.).
- Manners, R.B. y Doyle, M.W. 2008. A mechanistic model of woody debris jam evolution and its approach to wood-based restoration and management. *River Research Applications*, (24), 1104-1123. doi: 10.1002/rra.1108
- Maza, J.A., y García, M. (1989). *Estabilización y Rectificación de ríos*. México: Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial de la UNAM.
- Muñoz. (2011). *Cómo Elaborar y Asesorar una Investigación de Tesis*. México: Pearson Educación.
- Odebrecht.S.A (2011). *Defensas Ribereñas -Zona la Pastora*. (Informe n.d.). Lima: Editorial Odebrecht.
- Rafferty, M. (2013). *Development of a computational design tool for evaluating the stability of large wood structures proposed for stream enhancement*. (Tesis de Maestría). Department of Civil Engineering Fort Collins, CO Colorado State University.
- Rocha, F. (2009). Consideraciones sobre las Defensas Fluviales con Espigones. En n.d., XVI *Congreso Nacional de Ingeniería Civil*. Congreso llevado a cabo en la Ciudad de Arequipa, Perú.
- Roni, P., Beechie, T., Pess, P. y Hanson, K. (2015). Wood placement in river restoration: fact, fiction, and future direction. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72(3), 466-478. doi:10.1139/cjfas-2014-0344
- Scottish Environmental Protection Agency. *Conceptual Design Guidelines: Application Of Engineered Logjams*, 2006. Galashiels, United Kingdom. Recuperado de https://www.sepa.org.uk/media/152246/wat_sg_37.pdf
- Shields, D. (2016). Planeamiento y Diseño para la Rehabilitación de Ríos usando Grandes Restos de Madera. En Castro, L. (Organizador), *Metodología para Reforestar Ríos Degradados por Actividades Humanas Usando Técnicas de Bioingeniería*. Curso llevado a cabo en Laboratorio Nacional de Hidráulica-UNI, Lima, Perú.
- Suarez, J. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*. Bucaramanga, Colombia: División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.
- United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service. (2007). National engineering handbook. Part 654, Stream Restoration Design. Recuperado de <https://directives.sc.egov.usda.gov/viewerFS.aspx?hid=21433>
- Yossef, M. (2002). *The effect of Groynes on Rivers, Literature Review*. (Estado del Arte-Tesis Doctoral). Recuperado de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:b9545ba7-2423-4c20-ace2-0e1cd799d18a?collection=research>
- Yossef, M. (2005). *Morphodynamics of River with Groynes* (Tesis Doctoral). Delft University of Technology, Faculty of Civil Enngineering and Geosciences, Hydraulic Engineering Section, Holanda.

ANEXOS

Anexo 1. Propiedades del suelo y sustrato. Modificado de: *Large Woody Material - Risk Based Design Guidelines* (Rafferty, 2013).

Tamaño del Grano (mm)	Tipo de Sedimento	Peso unitario seco promedio (lb/ft ³)	Ángulo de fricción interna (Grados)
Roca de lecho	Roca de lecho	165	-
256 -2048	Roca	146	42
128-256	Canto rodado Grande	142	42
64-128	Canto rodado Pequeño	137	41
32-64	Grava muy Gruesa	131	40
16-32	Grava Gruesa	126	38
8-16	Grava Media	120	36
4-8	Grava Fina	115	35
2-4	Grava muy Fina	109	33
1-2	Arena muy Gruesa	103	32
0.5-1	Arena Gruesa	98	31
0.25-0.5	Arena Media	94	30
0.125-0.25	Arena Fina	93	30
0.063-0.125	Arena muy Fina	92	30
0.004-0.063	Limos	82	30
<0.004	Arcillas	78	25

Anexo 2. Tasa de aumento del radio de curvatura y migración del centroide de los Meandros 27 a 34 para los años 1985 -2000 y 2000-2015.

# Meandro	Tasa Aumento- Radio de Curvatura		Tasa de Migración del Centroide	
	(1985-2000)	(2000-2015)	(1985-2000)	(2000-2015)
	ΔR_{85-00}	ΔR_{00-15}	Mr_{85-00}	Mr_{00-15}
27	-5.28	-8.55	13.24	14.84
La Pastora	-0.24	-5.41	1.10	8.79
29	0.72	4.47	1.37	3.77
30	6.36	11.62	4.93	16.35
31	9.74	-5.40	10.24	7.30
32	-1.48	2.58	1.48	2.47
33	-4.56	-2.86	3.85	4.50
34	-0.17	0.12	1.12	0.48

Anexo 3. Estudio de la Migración lateral. Geometría de los Meandros 27 a 34.

	Meandro	Longitud del Meandro	Geometría del Círculo Circunscrito Año 1985		
			Coordenadas del Centro		Radio
			x	y	R_{85}
1985	M27	3900.4	1124964.5	8602095.6	1651.7
	La Pastora	2633.3	1129243.5	8603135.8	1195.3
	M29	3485.6	1128046.9	8603634.2	2354.0
	M30	4533.8	1128220.5	8606772.6	1226.0
	M31	1861.4	1129670.5	8611516.6	729.2
	M32	2215.9	1133134.1	8611587.9	1442.6
	M33	1868.3	1134192.0	8611149.9	1242.4
	M34	5035.1	1133422.8	8602920.6	1469.9
	Meandro	Longitud del Meandro	Geometría del Círculo Circunscrito Año 2000		
			Coordenadas del Centro		Radio
			x	y	R_{00}
2000	M27	4128.4	1124817.7	8602229.2	1572.5
	La Pastora	2834.2	1129258.9	8603129.7	1191.7
	M29	3471.3	1128029.7	8603623.0	2364.7
	M30	4620.8	1128259.6	8606835.5	1321.3
	M31	2349.3	1129744.4	8611381.9	875.2
	M32	2231.6	1133143.9	8611607.8	1420.4
	M33	1925.7	1134248.1	8611163.7	1174.0
	M34	4841.3	1133406.8	8602925.8	1467.3
	Meandro	Longitud del Meandro	Geometría del Círculo Circunscrito Año 2015		
			Coordenadas del Centro		Radio
			x	y	R_{15}
2015	M27	3885.1	1124653.3	8602379.3	1444.2
	La Pastora	2574.9	1129367.3	8603054.8	1110.6
	M29	2634.5	1127977.6	8603600.9	2431.8
	M30	4892.0	1128348.8	8607063.9	1495.6
	M31	2372.0	1129694.3	8611479.3	794.2
	M32	2200.6	1133140.3	8611570.9	1459.2
	M33	2432.2	1134313.5	8611180.3	1131.1
	M34	4971.0	1133399.7	8602925.8	1469.1

Anexo 4. Valores de coeficiente de importancia basado en el riesgo. Traducido de: *Large Woody Material - Risk Based Design Guidelines* (Knutson y Fealko,2014).

Clasificación- Riesgo a	Clasificación- Riesgo de	Coeficiente de
Alto	Alto	1
Alto	Medio	0.9
Alto	Bajo	0.8
Bajo	Alto	0.7
Bajo	Medio	0.6
Bajo	Bajo	0.5

Anexo 5. Predicción de la Migración lateral. Geometría de los Meandros 27 a 34.

Datos del Meandro	Migración Respecto al Este (1985-2000)	Dezpl. del círculo inscrito (1985-2000)	Migración Respecto al Este (2000-2015)	Dezpl. del círculo inscrito (2000-2015)	Cambio Dir. desplazamiento del Meandro	Cambio del Ángulo de Dirección	Magnitud de Migración del centroide	Predicción Radio de curvatura para el año 2025
	θ_a	$\overrightarrow{c_{85} c_{00}}$	θ_b	$\overrightarrow{c_{00} c_{15}}$	$\theta_b - \theta_a$	θ_c	$\overrightarrow{c_{15} c_{20}}$	Rc_4
27	138.0	198.6	138.0	222.6	0.0	138.0	148.4	1358.6
La Pastora	338.0	16.6	325.0	131.8	-13.0	316.3	87.9	1056.5
29	213.0	20.5	203.0	56.6	-10.0	196.3	37.7	2476.4
30	58.0	74.0	69.0	245.2	11.0	76.3	163.5	1611.8
31	299.0	153.6	117.0	109.5	-	117.0	73.0	740.1
32	64.0	22.1	265.0	37.0	-	265.0	24.7	1485.0
33	14.0	57.7	14.0	67.5	0.0	14.0	45.0	1102.5
34	162.0	16.8	180.0	7.2	18.0	192.0	4.8	1470.3